

CO₂ 용접에서 스파터 발생에 미치는 지연시간 제어의 영향

이창한* · 김희진** · 강봉용**

Effect of Delay Time Control on the Spatter Generation in CO₂ Welding

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

Key Words : Delay time(지연시간), Weld pool(용융지), Spatter(스패터), Oscillate(유동), Instantaneous short circuiting(I.S.C)(순간단락), Normal short circuiting(N.S.C)(정상단락)

Abstract

For the last two decades, waveform control techniques have been successively developed and applied for the inverter welding machines resulting in the substantial reduction of spatter generated in CO₂ welding. One of the constituents commonly involved in those techniques is to delay the instant of current increase to some extent after the initiation of short-circuiting. Although this technique has been known to be quite effective in reducing the spatter generation through the suppression of instantaneous short circuiting, the delay time necessary for minimum spatter has not been clearly understood. In this study, the control system for varying the delay time was constructed so that the spatter generation rates could be measured over a wide range of delay time, 0.29 - 2.0 msec. As a result of this study, it was demonstrated that spatter generation rate(SGR) sharply decreased at delay time of 0.6 msec and longer accompanied with the change in characteristics of short circuit mode from the instantaneous short-circuiting(ISC) dominant to normal short-circuiting(NSC) dominant. Another feature that have been found in current waveforms of over 0.6msec was the creation of current pulse right after the arc reignition stage. Because of this current pulses weld pool oscillated in wave-like fashion and it looks like to play an important role in developing short circuiting between electrode and weld pool.

1. 서 론

CO₂용접에서 스파터를 발생시키는 원인은 여러 가지가 있는데, 그 중의 하나가 순간단락이다¹⁾. 순간단락은 주로 용융풀의 유동에 의해 용적과 용융풀이 순간적으로 접촉하였다가 분리되는 현상으로써, 단락기

간 동안 용융금속의 이행은 이루어지지 않는다. 그러나 충분히 성장한 용적과 용융풀이 분리되면서 용적하단 부에서 발생하는 아크 힘에 의해 상부의 용적이 파괴되면서, Fig. 1에서 보여주는 바와 같이, 대립의 스파터가 발생한다²⁾.

1980년 이후 인버터 용접전원에 파형 제어개념이 도입되면서부터 파형 제어에 의해 순간단락이 발생하

※ 1999년 5월 6일 접수

* 학생회원, 명지대 및 한국생산기술연구원

** 정회원, 한국생산기술연구원

이창한 : chlee@kitech.re.kr

지 않도록 하는 기술개발이 계속되었다. 이러한 노력의 결과로써 '지연시간 제어' 방법이 실용화되었으며, 이러한 기법은 현재 거의 모든 파형 제어기법에 적용되고 있다³⁻⁵⁾.

기존의 단락이행에서는 단락 개시와 함께 전류가 상승하게 되는데²⁾ 지연시간 제어는 단락 개시 순간에 전류를 급격히 떨어뜨린 다음 일정시간 동안 저전류 상태가 유지되도록 하고, 일정시간이 경과한 후에 전류가 상승되도록 하는 방법이다. 이러한 지연시간 제어에서 가장 중요한 변수중의 하나가 지연시간의 길이인데, 지금까지 발표된 연구결과를 보면 최적의 지연시간에 대해서는 많은 차이를 보여주고 있었다. 최초로 지연시간과 스파터 발생량의 상관관계를 연구한 Mita 등⁶⁾은 3.5msec정도가 적정조건이라 하였다. 그러나, 저자들이 외산 용접기를 구매하여 실제 파형으로부터 지연시간을 측정해 본 결과, 실제 적용된 지연시간은 0.5~1.45msec 범위에서 모두 상이하다는 것을 알 수 있었다^{2,3,5)}.

이에, 본 연구에서는, Mita의 실험과 같이, 지연시간에 따른 스파터 발생량의 변화를 실험적으로 측정하고 측정 결과로부터 적정 지연시간을 도출하고자 하였다. 그리고 파형분석 및 고속사진 촬영을 동시에 수행함으로써 지연시간 변화에 따른 단락특성과 용적이행현상의 변화를 규명하고자 하였다. 이러한 실험을 위해서는 지연시간을 임의적으로 변화시킬 수 있는 제어장치를 자체적으로 제작하여야 하였다.

2. 실험방법 및 실험기자재

2.1 용접기자재 및 용접조건

본 실험에 사용된 용접전원은 정격전류 350A의 인버터 용접기로서 국내 H사에서 제작된 것이다. 이 용접기는 파형 제어기능이 전혀 없는 용접기이다. 본 연구에서는 H사의 용접기에 지연시간을 제어할 수 있는

별도의 제어기를 제작하여 부착하였다.

그리고, 용접 실험에 사용된 용접재료는 전기도금법에 의해 Cu도금된 직경 1.2mm의 CO₂용접용 와이어(KS 규격: YCW11)로써, 와이어의 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(WFR = 5.5m/min), 모재와 팁 사이의 거리(CTWD = 14mm), 용접속도(250mm/min), 보호가스 유량(20 l/min)등이 동일한 상태에서, 단지 지연시간만을 0.29~2.00msec범위에서 Table 2와 같이 변화를 주었다. 지연시간 동안에 전류는 30A~50A에서 유지되도록 하였다. 이러한 조건에서 용접을 실시하고 용접전류 및 전압을 측정하였는데, Table 2에서 보여주는 바와 같이 지연시간이 변화함에 따라 전류와 전압값이 다소 변동하였다. 전압·전류 모두 지연시간이 증가함에 따라 감소하는 경향을 보여 주고있는데, 전압은 최대 2V, 전류

Table 2 Welding voltage and current varied with delay time.

Delay time(msec)	Voltage(V)	Current(A)
0.29	24.2	196
0.45	23.9	195
0.60	21.3	199
0.75	21.4	195
0.90	21.1	199
1.06	21.5	191
1.20	21.9	181
1.60	21.4	186
2.00	21.2	186

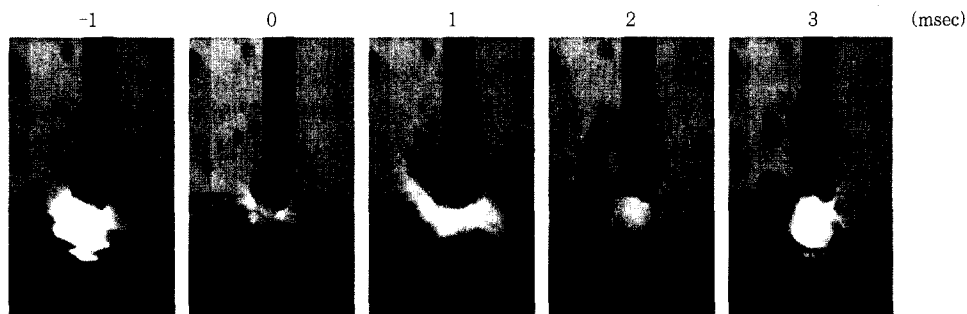


Fig. 1 Spatter generation by instantaneous short circuit (ISC)

는 최대 15A의 차이를 보여주었다.

용접이 완료된 후에 발생한 스파터는 일정 크기이상을 포집하여 스파터 무게를 측정하고, 이를 스파터발생율(spatter generation rate, SGR)로 계산하였다⁷⁾.

한편 급속이행 현상을 관찰하기 위하여 1000frame/sec의 속도로 용접현상을 고속촬영 하였다. 본 연구에 사용된 고속카메라는 디지털 영상자료를 DRAM(Dynamic Random Access Memory)에 저장하는 방식을 사용하고 있어, 촬영 즉시 영상이 카메라의 기억소자로 입력되어 저장되는 장비이다.

용적이행현상을 촬영하기 위해서는 강렬한 아크 빛을 극복하여야만 하기 때문에, 300W 할로겐 광원 3개를 동시에 사용하였다. 할로겐 광원이나 아크 빛과 같이 강렬한 빛이 직접 CCD 소자에 비춰지게 되면 고속카메라의 CCD 소자가 포화영역에 놓이게 되고, 그 결과로 전기적 잡음이 발생하기 때문에, 이를 방지하기 위하여 ND필터를 사용하여 주변 빛을 감쇠 시켜주었다.

2.2 제어기 구성 및 동작원리

Fig. 2는 지연시간제어를 위하여 자체 제작한 제어기의 흐름도(block diagram)이다. 본 제어기를 용접기에 적용하게 되면, 용접기는 자체 제어(remote control)에 의해 설정된 전압·전류 조건에서 동작을 하다가(A스위치 ON, B스위치 OFF), 제어기가 단락순간임을 감지하면 본 회로의 기능이 멈추고(A스위치 OFF) 제어기가 작동하기 시작한다(B스위치 ON). 그리고 지연기간 제어가 시작되는 순간에 리액터

(reactor)에 잔류되어 있는 전류는 저항에 의해 방전된다. 지연시간이 경과한 후에는 다시 PWM제어 방식으로의 전환이 이루어져, 용접전원의 자체제어에 의해 용접이 이루어지도록 제어기가 구성되어 있다.

본 제어기가 원활히 작동하기 위해서는 급속히 강하하는 전압변화로부터 단락시작 순간을 정확히 판별할 수 있어야 한다. 이를 위해서는 우선적으로 용접아크 현상과 상관이 없는 파형, 즉 노이즈를 제거하여야 하기 때문에 모든 전기적 신호는 로우패스(low pass)필터를 거치도록 하였다. 그리고, 본 제어기에 입력되는 전압신호는, 용접전원 단자에서의 전압이 아니라, 모재와 콘택트 팁 사이에서의 아크전압이다. 이는 전압신호에 혼입될 수 있는 노이즈를 최대한 억제하기 위한 것이었다.

상기한 제어기의 구성으로, 입력단자에서 들어오는 아크전압 신호(signal input)는 필터를 통해 용접 중 발생하는 노이즈가 제거된다. 노이즈가 제거된 입력전압은 비교기(comparator)에서, 기 설정된 전압값(voltage detector volume)과 비교되어, 비교값보다 높으면 아크상태로 판정하여 입력전압이 통과된다. 그러나 입력전압이 비교전압보다 낮아지면 이를 단락순간으로 판정하고 이때부터 전류가 일정시간 상승하지 못하도록 지연시간 제어(current control timer)가 적용된다. 지연시간 동안에는 용접기의 PWM제어부에서 기준전압을 낮추어 전류(base current control)를 낮게 유지시켜 주게된다. 이 때 지연시간이 적용됨을 LED로 나타내 준다. 지연시간은 타이머에 설정된 시간만큼만 지연되고, 설정된 지연시간이 경과하면 다시 PWM제어부와 제어기가 분리되면서 용접기 내부

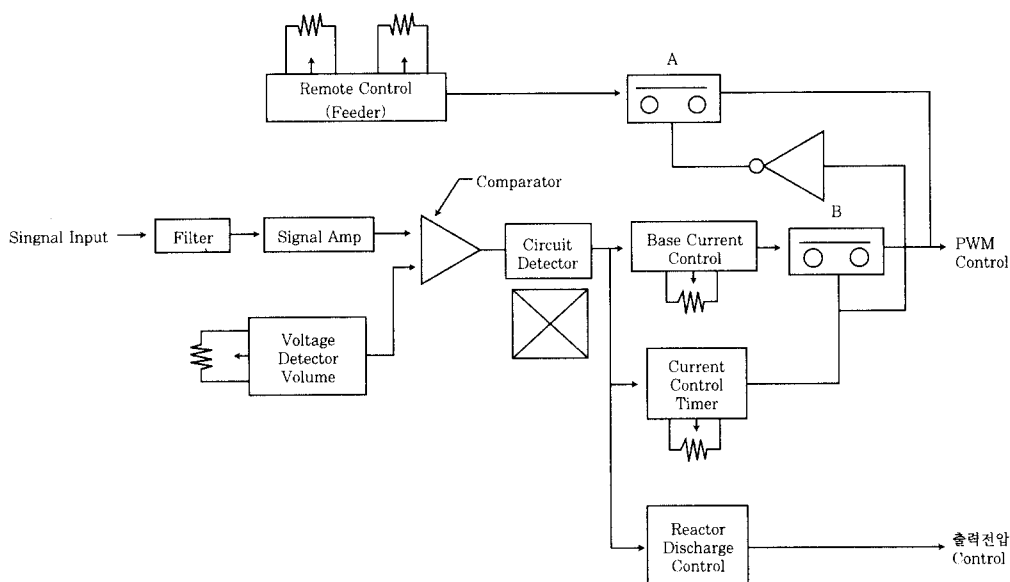


Fig. 2 Block diagram of electric circuit for controlling delay time

회로에 의해 용접이 진행된다.

2.3 리액턴스 조정

원래 H사의 용접기에는 리액터 턴(turn)수가 26턴이 사용되었는데 코일의 턴수가 많아질수록 전류자장이 커지면서 순시적인 제어가 어렵게 된다. 이러한 이유로 리액터의 턴수를 7턴으로 보정하여 순시적인 제어가 보다 용이하도록 하였는데, 정확한 리액턴스 값은 측정하지 못하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 지연시간에 따른 용접 파형분석

Fig. 3은 제어기를 장착하지 않은 상태에서 측정된 전압·전류 파형이다. 이는 전형적인 단락이행 파형을 보여주고 있는데, 단락과 함께 아크는 소멸되고 전압은 순간적으로 강하한다. 제어기가 장착되면, 제어기는 강하하는 전압을 중간위치에서 감지하여 작동하게 된다. 본 실험에서는 비교기를 18V에 셋팅하여, 전압이 18V 이하로 강하하면 제어기가 작동하도록 하였다.

Fig. 4는 지연시간 제어를 하였을 때 나타나는 전압과 전류파형을 보여주고 있다. 본 파형은 지연시간이 0.29msec인 경우인데, 단락순간의 전압강하 과정에서 단락이 감지되고, 감지순간에 전류는 30~50A수준으로 급격히 저하되어 0.29msec 동안 유지되고 있다. 지연시간이 경과되면 전류는 400A 이상으로 급격히상

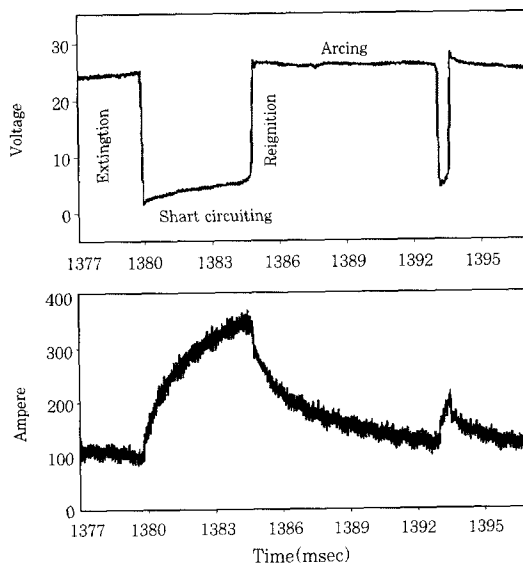


Fig. 3 Typical voltage of current waveforms of short circuiting transfer mode.

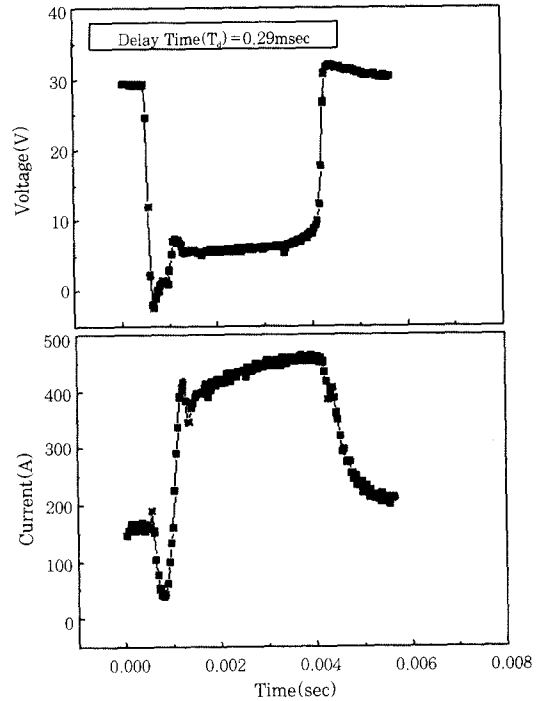


Fig. 4 Voltage and current waveforms for the delay time of 0.29msec

승하는데 상승기울기는 약 960A/msec이다. 그런 후 전류는 아크 재생시점까지 서서히 증가하여 450A정도에서 아크가 재생되고 있다. 이러한 파형 형상은 지연시간이 0.45msec에서도 동일하게 보여주었다.

한편 Fig. 5는 지연시간이 0.8msec인 경우의 전압 및 전류파형을 보여주고 있다. 이러한 파형은 지연시간이 0.6msec이상인 조건에서는 모두 동일하게 나타났다. 이를 Fig. 4와 비교하여 보면 전류 상승속도에서 커다란 차이가 있음을 발견할 수 있다. 즉 지연시간 후 전류는 약 170A까지만 급격히 상승하고, 상승기울기는 360A/msec정도이다. 이후 전류는 서서히 증가하여 약 340A에서 아크가 재생되고 있다. 아크가 재생한 후 전류는 약 40~60A정도 급격히 떨어졌다가 400A 이상으로 급격히 상승하여 펄스형태로 약 0.7msec정도 유지되었다. 이러한 펄스전류는 지연시간이 0.6msec이상인 조건에서는 모두 나타나는 현상이었다.

펄스파형이 추가적으로 유입되었다는 실험결과와는 본 제어기가 지연시간제어만을 목적으로 제작되었으나 실제 용접기와 연계되어 작동할 때에는 전반적으로 영향을 미친다는 사실을 보여주고 있다. 이러한 연계동작에 대해서는 제어기의 회로와 용접전원의 회로를 동시에 검토하여 원인을 규명하여야 할 사항이지만, 용접전원의 회로를 검토할 수 없는 상황이었기 때문에 유입원인을 규명하지 못하였다.

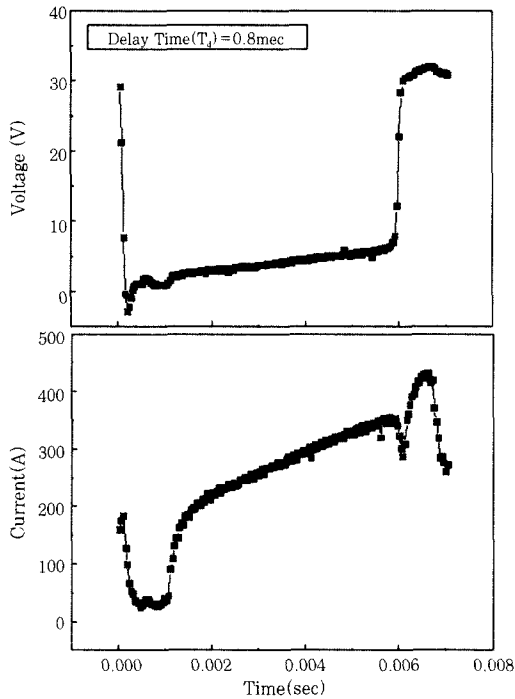


Fig. 5 Voltage and current waveforms for the delay time of 0.8msec.

그런데, 다음에도 기술하겠지만, 이러한 펄스파형은 단락이행의 급속이행 현상에 커다란 영향을 미칠 뿐만 아니라, 결과적으로 스파터 발생량의 절감에도 기여하는 것으로 규명되었기 때문에 향후에라도 펄스파형 생성원인에 대해서는 필히 규명되어야 할 것이다.

Fig. 6은 전반적인 파형형태를 보여주기 위하여 0.5msec동안 얻어진 파형을 보여주고 있는데, 지연시간의 크기에 따라 단락 특성이 크게 변화하고 있음을 보여준다. 지연시간이 0.29msec인 조건에서는 단락 기간이 짧을 뿐만 아니라 단락주기도 매우 불규칙하게 나타나고 있는데, 그러한 현상이 0.6msec이상에서는 거의 나타나지 않고 있다. 이러한 단락 특성의 변화에 대해서는 다음절에서 보다 자세히 분석하였다.

3.2 지연시간에 따른 단락특성 비교

Fig. 7은 시간에 따른 전압·전류 파형(Fig. 6)을 V-I곡선으로 편집한 것인데, 이에 사용된 파형은 2초 동안의 결과이다. 파형제어가 적용되지 않은 경우에는 사각형 모양의 V-I폐곡선은 보여주는데(참고문헌 2의 그림3과 같이), 본 연구에서는 지연시간제어를 하였기 때문에 좌하단 꼭지점에 돌기가 나타나고 있는 것이 특징이다. 그리고 Fig. 7의 결과는 지연시간의 길이가 아크 재생순간의 전류에도 영향을 미치고 있음을 보다 확실히 보여주고 있다. 즉, 지연시간이 0.29msec일

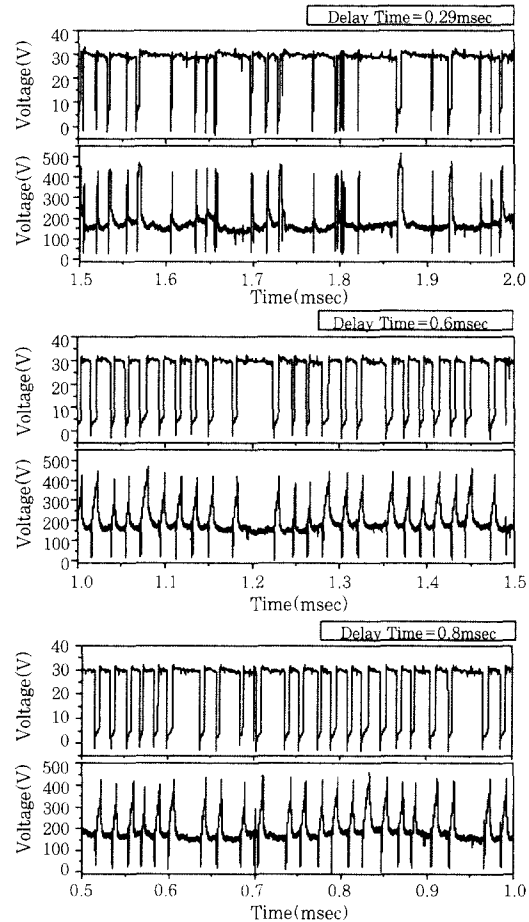


Fig. 6 Wide range waveforms with different delay times.

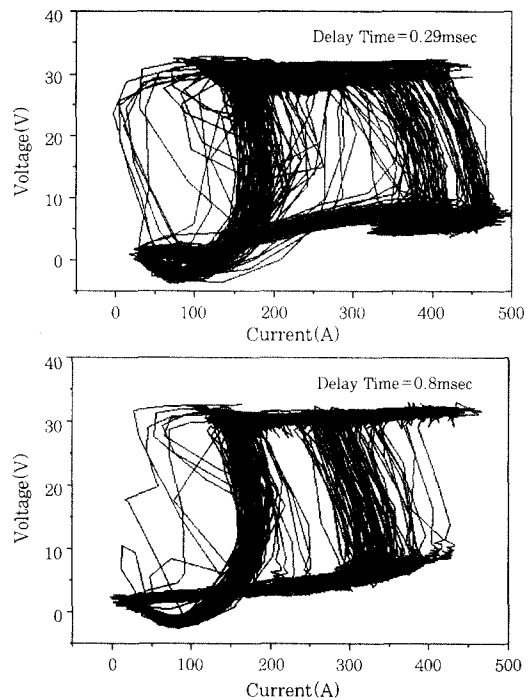


Fig. 7 V-I loops constructed for the delay time of 0.29 and 0.8msec.

경우에는 아크재생순간의 전류치가 450A수준이었던 것이, 0.8msec의 경우에는 300A수준으로 낮아지고 있다. 그리고, 지연시간이 0.8msec인 경우에는 V-I 폐곡선이 균일화되면서 내부 공간이 보다 깨끗하여 절연을 알 수 있는데, 이는 순간단락 횟수가 감소하고 단락 주기가 보다 균일해진 결과이다.(Fig.6)

Fig. 6의 파형을 보다 정량적으로 분석하기 위하여 파형분석 프로그램을 이용하여 단락시간분포를 분석하였다. Fig. 8은 2초동안 얻어진 모든 단락에 대해서 단락기간에 따른 단락횟수를 도표화한 것이다. 지연시간이 0.29msec인 경우에는 단락기간이 2msec이하인 단락이 많이 나타나고 있는데, 지연시간이 0.6 및 0.8msec으로 증가하면 단락기간이 4~8msec으로 증가하였다. 그리고 0.6과 0.8msec의 경우를 상호 비교하여 보면, 0.8msec에서 단락기간의 편차가 다소 감소하였음을 알 수 있다.

이와 같이 지연시간의 크기에 따라 단락특성이 변화하는 경향을 보다 명확히 하기 위하여, 모든 단락을 순간단락(I.S.C : 단락기간이 2msec 이하인 단락)과 정상단락(N.S.C : 단락기간이 2msec 이상인 단락)

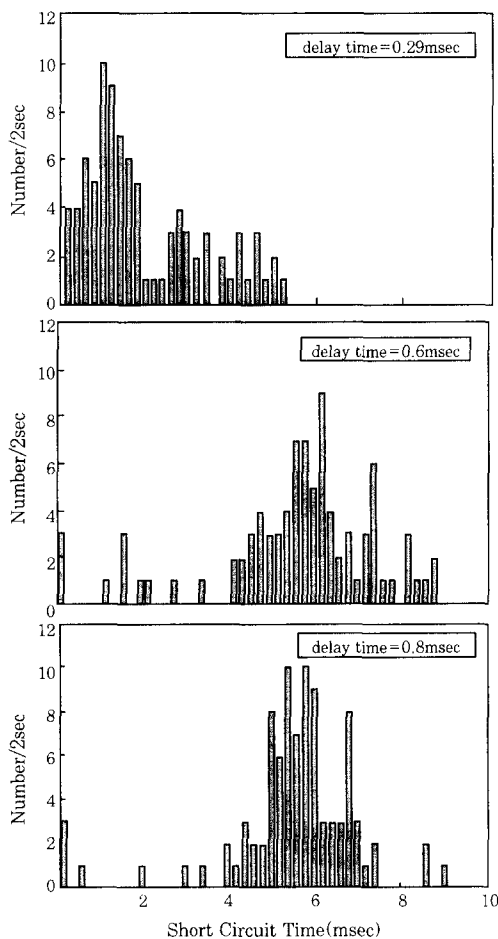


Fig. 8 Effect of delay time on short circuiting characteristics.

으로 구분하여 각각의 횟수를 지연시간에 따라 나타내어 보았다. Fig. 9는 분석한 결과를 보여주고 있는데, 0.6msec를 경계로 하여 급격한 변화가 있음을 알 수 있다. 즉 지연시간이 0.6msec보다 짧으면 순간단락이 60회 이상으로 정상단락 숫자보다 많은 반면, 0.6msec부터는 순간단락 횟수가 10회 이하로 급격히 감소하면서 정상단락 횟수가 상대적으로 증가함을 보여주고 있다. 이와 같이 0.6msec를 경계로 하여 순간단락 및 정상단락횟수는 급격한 변화를 보여주지만, 전체단락횟수(total)는 약 90회 정도로 일정하다. 따라서 지연시간이 0.6msec 이상으로 증가하면 순간단락횟수가 감소한 만큼 정상단락 횟수는 증가하였다고 할 수 있다.

지연시간이 0.6msec이상인 조건에서는 파형 특성에 있어서 커다란 차이점은 없지만, 0.8~1.2msec구간에서 순간단락/정상단락의 비율이 약 5%로 최소가 됨을 알 수 있었다. 따라서 본연구가 수행된 용접조건에서 지연시간이 0.8~1.2msec인 조건에서 가장 바람직한 파형이 얻어진다고 결론 지을 수 있다.

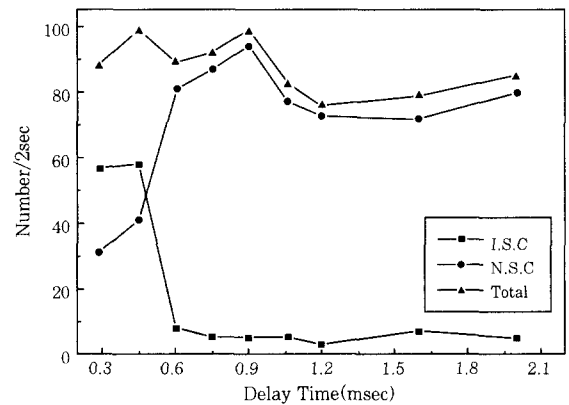


Fig. 9 Effect of delay time on the frequencies of I.S.C and N.S.C.

3.3 지연시간에 따른 스파터 발생률

Fig. 10은 지연시간에 따른 스파터발생률(SGR)의 변화를 보여주는 시험결과이다. 스파터발생률은 0.6msec를 경계로 하여 급격히 감소하는 경향을 보여 주는데, 이는 Fig. 9에서 보여주는 바와 같이 순간단락횟수가 급격히 감소하는 경계이기도 하다. 따라서 이들은 스파터 발생률이 순간단락횟수와 밀접한 관계가 있음을 보여주는 결과이다.

이를 파형 분석결과와 종합하여 보면, 스파터발생률 최소화하기 위해서는 지연시간이 일정시간(0.6msec) 이상이 되어야하는데, 파형특성 측면에서 보면 최적의 지연시간은 순간단락/정상단락의 비율이 가장 작아지

는 0.8~1.2msec범위라고 할 수 있다. 그런데 이러한 범위는 최근 일본에서 개발되어 상품화된 인버터 용접 전원에서 적용되고 있는 지연시간 1.45msec와 매우 유사하며³⁾ 유등⁵⁾이 이론해석을 통하여 제시한 1.5msec와도 유사하다.

그러나 여기서 최적조건으로 제시한 지연시간의 범위는 Mita⁶⁾의 시험 결과와 커다란 차이를 보여주고 있다. Mita는 3.5msec가 적정 지연시간이라고 하였는데, 순간단락의 최대 단락기간이 2msec임을 고려해 보면 3.5msec의 지연시간은 정상단락 까지도 제어하는 것이 되기 때문에 다소 문제점이 있어 보인다. 그럼에도 불구하고 그들의 결과와 차이가 나는 원인을 생각해 보면 우선적으로 파형제어 기법의 차이와 사용된 용접전원의 특성이 다르기 때문이라고 생각된다.

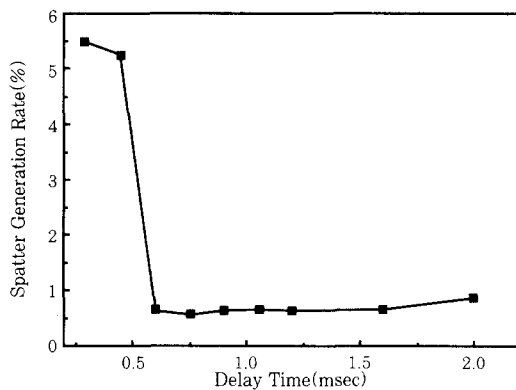


Fig. 10 Effect of delay time on the spatter generation rate.

3.4 금속이행 현상

지연시간제어가 금속이행현상에 미치는 영향을 보기 위하여 고속사진 촬영한 결과가 Fig. 1과 Fig. 11이다. Fig. 1은 제어가 없는 상태에서 순간단락 과정을 보여주고 있는데, 본 그림은 단락 직후 1msec이내에 재아크가 발생하면서 강력한 아크의 폭발력에 의해 대립의 스패터가 발생하는 현상을 보여주고 있다. 이로부터 스패터발생율을 감소시키기 위해서는 순간단락 현상이 무엇보다 우선적으로 억제되어야 한다는 사실을 다시 한번 입증하고 있다.

Fig. 11은 정상단락의 경우인데, (a)는 지연시간 제어를 하지 않은 상태에서 단락기간이 5msec인 단락이행 과정을 보여주고 있으며, (b)는 지연시간 (0.8msec)제어를 한 경우인데 단락기간이 8msec인 단락이행 과정을 보여주고 있다. 이들은 모두 동일한 용접조건에서 용접시작과 함께 2초동안 촬영한 결과로부터 대표적인 정상단락 한 주기만을 선정하여 보여

주고 있는 것이다. 실제 2초동안 진행되는 모든 정상 단락을 보면서 확인한 사항이지만 제어적용여부에 따라 단락형성 과정에 차이점이 있었다. 파형제어가 없는 경우에는(Fig. 11(a)) 용융풀이 거의 정체되어 있는 상태에서 와이어 선단이 내려오면서 용융풀과 접촉되어 단락이 형성되는 것처럼 보이는 반면, 파형제어가 있는 경우에는 용융풀이 후방에서 파도처럼 와이어 선단으로 밀려와서 용적을 휩쓸고 내려가는 거동을 보여 주었다. 이렇게 휩쓸고 내려가는 과정에서 단락이 형성되었다가 끊어지기 때문에 단락주기가 보다 균일한 상태로 용접이 진행될 수 있었다고 보여진다. 최근 개발된 용접전원에서는 이러한 효과를 얻기 위하여 펄스전류파형을 적용하였다고 보고되고 있는데⁹⁾, 적용된 펄스파형의 형상이 본 연구의 Fig. 5에서 보여주는 펄스파형과 매우 흡사하다.

일반적으로 단락이행은 용적의 성장과 와이어 송급으로 와이어 선단이 용융풀에 접근하여 단락이 형성된다고 설명되고 있는데, 이러한 과정에서 용융풀 거동은 거의 고려되지 않았다. 그런데 최근 Herman등¹⁰⁾은 GMA용접의 안정성을 용융풀 유동으로 해석하면서, 아크재생 순간에 발생하는 순간적인 아크력과 용융금속이 용적으로부터 용융풀로 이동하면서 발생하는 모멘트에 의해 용융풀 유동이 발생된다고 하였다. 따라서 용융풀의 중앙이 최고점에 도달하는 순간에 단락형성이 보다 용이하다는 것이다.

그런데 만약 용융풀의 유동이 심하게 되면 용융풀 유동이 단락 형성과정을 주도할 수도 있을 것이라고 가정할 수 있는데, 용융풀 유동을 강화시키는 방법의 하나로써 아크재생 직후에 의도적으로 펄스전류를 부가하는 것을 생각할 수 있다. 이러한 가정이 맞다면 펄스파형에 의한 용융풀 유동으로 단락이 보다 강제적으로 유도될 수 있다는 것인데, 이러한 가정이 현실적으로 나타나고 있음을 Fig. 11(b)에서 보여주고 있다. 이러한 상황에서는 용융풀 유동주기에 의해 단락주기가 결정될 뿐만 아니라 금속이행도 용융풀 거동과 함께 이루어지기 때문에 스패터 발생도 억제될 수 있을 뿐만 아니라, 이러한 상황에서는 용융풀의 유동정도 및 유동의 세기가 단락형성 및 단락횟수를 결정하는 주요한 인자가 될 것이다.

4. 결 론

CO₂ 용접의 단락이행 조건에서 스패터 발생량을 저감하고자 '지연시간 제어'를 실시하고, 지연시간 변화에 따른 파형특성을 분석하고 스패터발생율을 측정한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

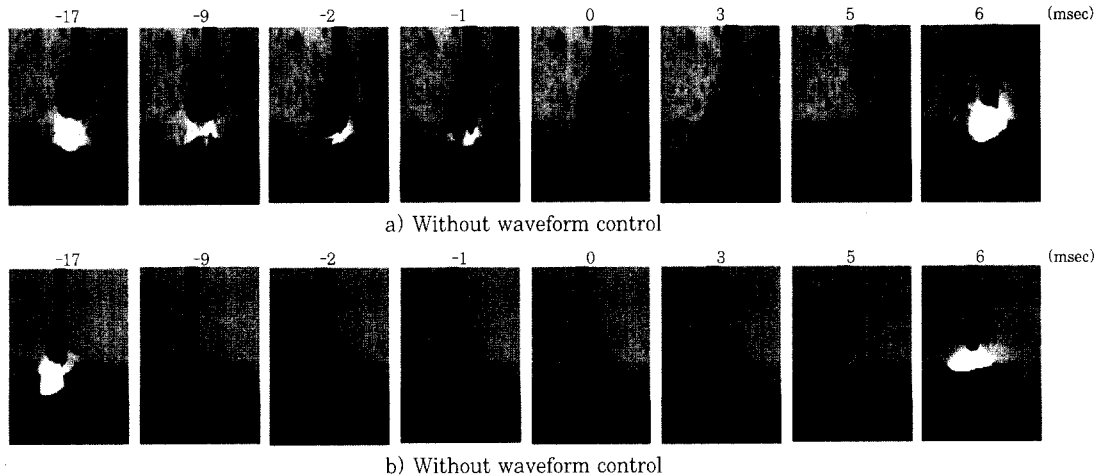


Fig. 11 High speed photos of short circuiting transfer mode

(1) 지연시간 0.6msec를 경계로 하여 파형특성, 스파터 발생량 및 펄스전류파형 존재여부 등에 커다란 차이를 보여 주었다.

(2) 지연시간이 0.6msec 보다 적으면, 순간단락 횟수가 많고 스파터 발생량이 많으며, 아크 재생 직후 펄스전류 파형이 생성되지 않았다. 그러나 지연시간이 0.6msec 이상이 되면, 순간단락 횟수가 급격히 감소하면서 정상단락 횟수가 급격히 증가하였다. 그리고 아크재생 직후의 펄스전류 파형이 나타났다.

(3) 아크재생 직후에 발생하는 펄스전류는 용융풀을 강하게 밀어내어 용융풀이 파도와 같은 유동을 하게 하여 단락형성과정을 지배하는 것으로 나타났다.

참고 문헌

1. T. Ito, F. Koshiishi, M. Sato, T. Suga, M. Ushio : A study on spatter reduction in pulsed CO₂ gas shielded arc welding, 일본용접학회논문집, 제15권, 제3호(1997), p.432
2. 김희진, 이창한 : GMA 용접전원의 파형 제어기법 분석, 대한용접학회지, 제16권, 제5호(1998), p.39
3. 김희진, 이창한 : GMA 용접전원의 최신 파형 제어기법 분석, 대한용접학회지, 제16권, 제6호(1998), p 26-31
4. T. Ogasawara, T. Maruyama, M. sato, Y. Hida : A newly Developed Arc Welding Power Source and Its Application in Combination with Arc Welding Robots, IIW Doc. XII-930-86 (1986)
5. 김희진, 김용석 : CO₂ 용접의 용접 스파터 저감을 위한 용접전류 파형제어개념, 대한용접학회지, 제16권, 제3호 (1998), p. 18
6. T. Mita : Waveform Control Method in CO₂ Gas Shielded Arc Welding, 일본용접학회논문집, 제6권, 제2호(1988), p. 209
7. 강봉용, 김희진 : CO₂ 용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향, 대한용접학회지, 제15권, 제2호 (1997), p. 72
8. 최상균, 고성훈, 유중돈, 김희진 : VOF방법을 이용한 GMA용접의 금속이행에 관한 동적해석(II), 대한용접학회지, 제15권, 제3호(1997), p.179
9. "CO₂ MAG 용접기 SENSARC LS350", 코배 용접기술 Guide, Vol. 37, No. 330(1997), p. 8
10. M. J. M. Hermans, G. Den Ouden : Process behavior and stability in short circuit gas metal arc welding, Vol. 78, No. 4(1999), p.137-s