

대전류 CO₂ 용접에서 스파터 저감을 위한 파형제어 기법 개발

김희진* · 강봉용*

한국생산기술연구원

Development of Waveform Control for Suppressing the Spatter Generation

Hee-Jin Kim* and Bong-Yong Kang*

*Korea Institute of Industrial Technology, Chonan 330-820, Korea

Abstract

A new waveform control technique has been developed for suppressing the spatter generation in the repelled transfer mode of high current CO₂ welding. Based on the generation phenomena of weld spatters in repelled transfer, a waveform control concept was established in a way to drop the welding current to lower level right before the pendant weld drop detachment so that the explosion force associating with drop detachment was decreased. There were several variables to be controlled such as the moment of current drop, the base current and the time of retention at the base current. Either at lower base current or at longer retention time, the more instantaneous shot circuits were introduced and thus the spatter generation rates were increased. With optimizing the control variables, the amount of spatter generated was decreased by about 30%.

(Received July 20, 2001)

Key Words : Repelled transfer, Waveform control, Spatter generation

1. 서 론

가스메탈 아크용접(GMAW) 중에서 CO₂가스를 보호가스로 사용하는 CO₂ 솔리드용접에서는 스파터가 다량 발생하는 문제점 때문에 용접생산성 향상에 있어서 커다란 장애요인이 되어 왔다^{1,3)}. 이러한 문제점을 해소하기 위하여 용접재료 뿐만 아니라^{3~9)} 용접전원 측면에서도 여러 가지 방법이 시도되어 왔는데, 특히 용접전원 측면에서는 용접전류의 파형 제어기술이 지속적으로 개발되어 커다란 효과를 보았다^{10~20)}. 그러나 현재까지 실용화되어 있는 파형제어기법들은 단락이행조건에만 적용 가능하도록 되어 있기 때문에 제어에 따른 스파터 저감효과가 저 전류 영역에서만 나타나고 있다^{15, 18~20)}. 저전류영역에서 나타나는 단락이행은 전기적 단락특성을 가지고 있어서, 단락순간과 아크재생순간이 아크전압신호에 명확히 나타난다. 그리고 이들 순간에 대부분의 용접스파터가 발생하기 때문에 전압

변화로부터 이들의 순간을 미리 감지하여, 각각의 순간에 전류를 급격히 강하시켜 일정시간 유지함으로써 스파터 발생을 억제하고 있다. 즉 스파터 발생순간을 미리 감지하여 이들 순간에는 저전류 상태가 유지되도록 제어하는 것이다.

CO₂용접에서는 전류가 증가함에 따라 단락이행으로부터 입상용적이행 중의 하나인 반발이행으로 천이하는데, 입상용적이행에서는 용적이 이행하는 동안에도 계속 아크상태가 유지되기 때문에 단락현상은 거의 나타나지 않는다. 따라서 단락현상을 이용한 제어기법은 반발이행이 주를 이루는 고 전류 CO₂용접에서는 제어효과를 기대할 수 없고, 단락이행과 반발이행이 혼재되어 나타나는 중 전류영역(천이이행 구간)에서는 제어 효과가 감소하게 된다. 따라서 전 전류 범위에서 스파터발생량을 절감하기 위해서는 반발이행 현상을 제어할 수 있는 제어개념과 이를 구현할 수 있는 제어장치의 개발이 필요하다.

이러한 필요성에 의해 저자들은 반발이행 과정을 먼

밀히 분석하여 스파터 발생순간과 발생원인 등을 규명하였으며²¹⁾, 본 연구에서는 이들 결과를 기본으로 하여 스파터 발생을 억제할 수 있는 제어개념을 도출하고자 하였다. 그리고 제안된 제어개념을 실험적으로 구현할 수 있는 제어기를 실험실적으로 구축하고, 구축된 제어기를 활용하여 스파터 발생량을 평가함으로써 기 제안된 제어개념의 유효성을 검증하고자 하였다.

2. 스파터 저감을 위한 파형제어 개념

Fig. 1은 반발이행 조건에서 나타나는 용접전압과 전류의 전형적인 파형을 보여주고 있는데, 이들은 하나의 용적이 와이어 선단으로부터 이탈하는 과정에서 나타나는 전압 및 전류파형이다. 이들 파형에는 용적이 와이어 선단으로부터 이탈되는 순간을 인지할 수 있는 신호를 보여 주고 있는데, 특히 용접전압에서는 매우 급격한 변화와 함께 피크신호를 보여주어 이탈 순간을 인식할 수 있다. 용적이 이탈하기 직전에는 가교가 형성되고 용적이 이탈하면 아크길이 급격히 증가하기 때문에 본 연구에서는 전압이 피크치에 도달하는 순간을 용적이 이탈하는 순간이라고 간주하였다.

한편 용적이행현상을 고속촬영한 결과를 보면 용적이 와이어 선단으로부터 이탈하는 과정에서 대부분의 스파터가 발생하고 있으며, 발생원인은 용적이탈 과정에서 수반되는 아크폭발력 때문임을 확인할 수 있었다²¹⁾.

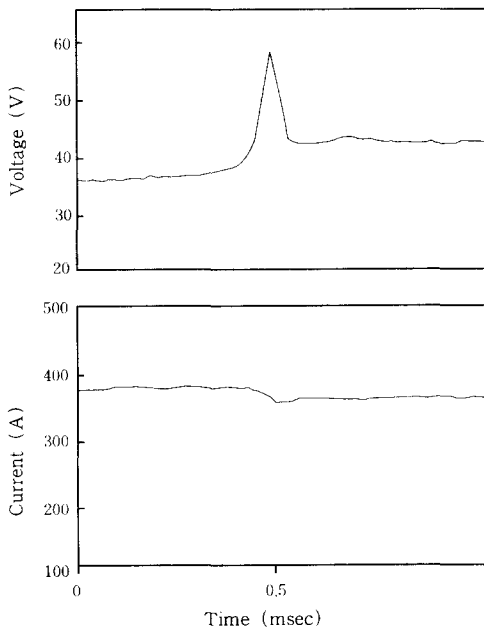


Fig. 1 One-drop waveforms generated in the repelled transfer of CO₂ welding

반발이행에서는 Fig. 1의 전류파형에서 보여 주었던 이 전 과정이 350A 이상의 고 전류상태에서 진행되기 때문에 아크 폭발력은 매우 강력할 수 밖에 없고, 이러한 폭발력으로 인하여 와이어 선단에 잔존해 있던 용융금속과 이탈된 용적 등이 파괴되어 스파터가 발생됨을 고속카메라 영상을 통하여 확인할 수 있었다. 이상과 같이 스파터 발생 순간과 발생원인에 기초하여 다음과 같은 제어개념을 수립하였다.

본 연구에서 추구한 제어개념은 용접 실시간에 스파터 발생원인을 최소화하는 것이다. 이러한 개념은 단락이행에서도 동일하게 적용되었던 것이다^{19,20)}. Fig. 2는 이러한 개념의 도입으로 예상되는 파형을 기존의 파형과 비교하여 도식적으로 보여 주는 것이다. 앞에서 설명하였듯이 반발이행에서는 용접스파터가 아크 폭발력에 기인함으로 이러한 폭발력을 최소화하게 되면 스파터 발생이 억제될 수 있을 것이다. 이를 위해서는 용적이탈 직전의 순간을 감지하여 용접전류를 최소화할 필요가 있다. 본 연구에서는 용적이탈 시점을 용접전압이 피크에 이르는 시점으로 간주하였기 때문에, 이 시점에서의 전류치를 최소화 하고자 하였다. 즉 Fig. 2의 (b)와 같이 용접전압이 피크에 이르기 직전에 용접전류를 저하시킴으로써 저전류 상태에서 용적이 이탈되도록 하는 것이 본 연구에서 추구하는 제어개념이다.

상기한 제어개념을 구현하기 위해서는 우선적으로 용적이탈 직전의 순간을 감지하여야 하는데, 본 연구에서는 용접전압의 순간 변화율(dV/dt)로부터 이 순간을 감지토록 하였다. Fig. 1의 용접전압 파형에서

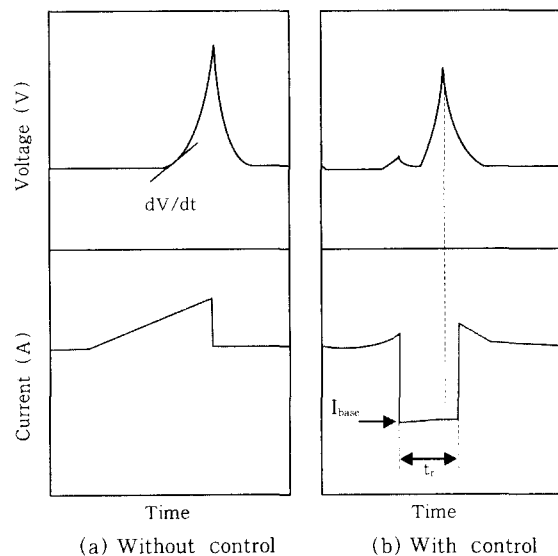


Fig. 2 Concept of waveform control technique designed for controlling the repelled transfer

보듯이, 용적이 이탈하기 직전에는(가교가 형성되는 과정에서 저항이 증가하여) 용접전압이 지수함수적으로 급격히 상승함을 보여주고 있다. 따라서 Fig. 2의 (a)에서 보여주는 용접전압 순간변화율(dV/dt)를 실시간에 정확히 감지할 수만 있다면, 그리고 변화율이 일정값에 도달하는 시점에서 전류를 급격히 하강시켜 일정시간 유지할 수만 있다면, Fig. 2(b)처럼 저전류 상태에서 용적이탈이 이루어 지도록 할 수 있을 것이다. 이것이 본 연구에서 추구하는 새로운 파형제어 기법이다. 이와 같은 파형제어기법을 적용함에 있어 스패터 발생량에 영향을 줄 수 있는 파형변수로는 전류 하강 시점에서의 순간전압변화율($(dV/dt)_c$), 베이스 전류(I_{base}), 베이스전류에서의 유지시간(time of retention, t_r) 등이 있을 수 있다.

3. 실험장치 및 실험방법

3.1 제어기 구성

상기한 파형변수들을 임의대로 변경시키면서 실험할 수 있는 파형제어장치를 자체 제작하여 500A급 인버터제어형 GMA용접전원에 부착하였다²³⁾. 전압검출은 콘택트 튜브와 모재 사이에서 전압신호를 받아 처리하였으며, 검출된 전압신호는 전압신호변환부에서 연산증폭기 및 필터를 통과하여 노이즈가 없는 저전압 상태로 변환하였다. 변환된 신호는 미분회로에 입력되어 순간전압변화율(dV/dt)을 도출하고, 도출된 수치가 일정수준($(dV/dt)_c$) 이상이면 전류제어기능이 작동하도록 하였다. 본 연구에서는 $(dV/dt)_c$ 값을 임의적으로 선정할 수 있도록 하였는데, 이를 본 연구에서는 전압감지순간변화율이라고 명명하였다. 미분회로에서 $(dV/dt)_c$ 신호가 감지되면 용접전류제어가 작동하기 시작하는데, 전류제어는 Fig. 2의 (b)에서 보여주는 베이스 전류(I_{base}) 그리고 유지시간(t_r) 등을 임의적으로 조정할 수 있도록 하였다.

3.2 실험방법

상기한 제어기를 500A급의 인버터 용접전원에 부착하고, 반발이행 조건(350A/38V)에서 350mm/min의 용접속도로 60초 이상 용접을 실시하고, 그 동안 발생된 스패터로부터 스패터 발생율(splatter generation rate, SGR)을 계산하였다. 스패터발생율은 용착금속 100g 당 발생하는 스패터의 무게이다. 용접이 진행되는 동안 전압과 전류치의 변화를 60초 동안 측정하여 컴퓨터에 입력하였다. 저주파 통과필터

를 사용하여 노이즈성분을 제거하였는데, 액티브필터를 사용하여 cutoff 주파수는 5kHz로 하였으며 샘플링 속도는 25,000Hz이었다. 그밖에 사용된 용접재료(YGW11, $\phi 1.2\text{mm}$) 및 스패터 포집방법 등은 기 보고한 바와 동일하다²⁾.

4. 실험결과 및 검토

4.1 제어파형의 특성

Fig. 2에서 제어 전과 후의 파형을 도식적으로 보여주었는데, 실제로 제어를 적용한 후에 나타난 파형은 Fig. 2(b)의 개념도와 상당한 차이를 보여 주었다. Fig. 3은 베이스전류($I_{base} = 210\text{A}$), 유지시간($t_r = 0.4\text{msec}$)의 제어조건에서 하나의 용적이 이탈하는 과정에서 보여주는 전압 및 전류파형이다. 용적이 이탈하기 시작하는 시점에 이르면 아크전압이 급격히 상승하게 되는데, 상승속도가 주어진 전압감지순간변화율 $(dV/dt)_c$ 에 도달하게 되면 전류제어기능이 작동하기 시작하여 전류는 베이스전류치로 급격히 저하하게 된다. 그런데 여기서 전류가 저하하는 속도를 보면, Fig. 2(b)의 개념도와 같이 수직적이지 못하고, 다소 완만한 경사를 가지고 저하하고 있다. 본 실험에서 설정된 베이스전류값은 210A인데, 이에 이르는 데 소요되는 시간은 약 0.28msec 이었다. 따라서 유지시간 설정치가 0.28msec 보다 적으면 베이스 전류에

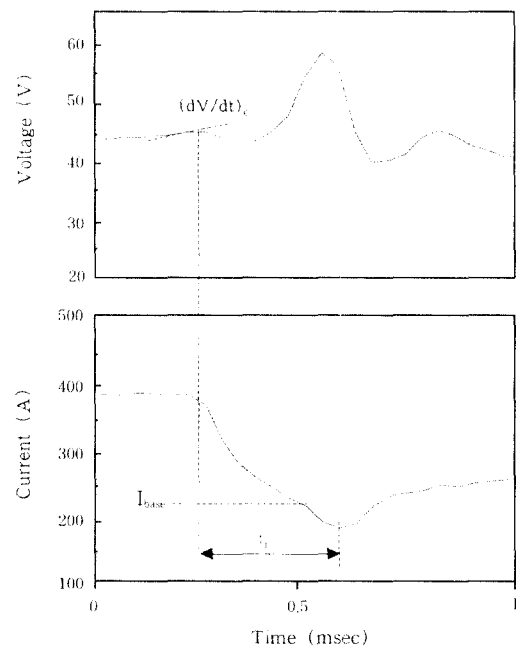


Fig. 3 One-drop waveforms experimentally generated by applying the concept shown in Fig. 2

도달하기도 전에 전류제어 기능이 해지되는 것이다. 한편 유지시간이 0.28msec 이상이면 Fig. 2(b)의 개념도와 같이 베이스전류치가 계속 유지되어야 하는데, 실제 전류파형에서는 전류가 일정하게 유지되지 못하고 계속 저하하였다. Fig. 3은 유지시간이 0.4msec의 경우로써, 약 30A정도의 추가 저하를 보여 주었다. 유지시간이 종료되면 전류는 아크상태의 전류로 복귀되는데, 복귀되는 과정에서 개념도와 같이 수직적으로 상승하지 못하고 매우 완만하게 상승하였다. 실제 파형에서는 정상 전류상태로 완전히 복귀하는데 소요되는 시간이 약 1.0msec 정도이었다. 이와같이 본 연구에서 사용한 제어파형은 Fig. 2의 개념도와는 많은 차이를 보여 주고 있어서, 향후 보다 정밀하고 미세한 제어가 가능하도록 제어장비의 보완되어야 함을 확인하였다.

Fig. 4는 3개의 용적이 연속적으로 이행하는 과정에서 나타나는 무제어 파형과 제어된 파형을 거시적으로

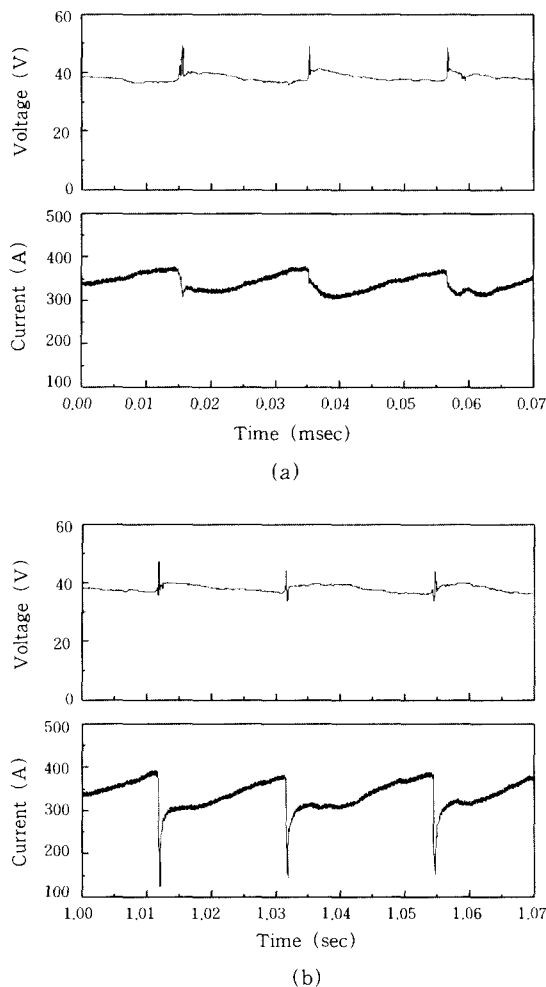


Fig. 4 3-drop waveforms generated (a) before waveform control and (b) after waveform control

로 보여 주고 있는데, 용적이 이탈하는 순간마다 의도한 전류제어가 적절히 작동하고 있음을 보여 주고 있다. 그 밖에도 제어파형에서는 순간단락이 다수 혼입되어 나타나고 있었는데, 이에 대해서는 다음의 실험 결과에서 자세히 설명하고자 한다.

4.2 전압감지순간변화율($(dV/dt)_c$)의 영향

Fig. 5는 베이스전류(I_{base})를 210A, 그리고 유지시간(t_r)을 0.28msec로 고정한 상태에서, 전압감지순간변화율($(dV/dt)_c$)의 변화가 파형에 미치는 영향을 보여주는 결과이다. 여기서 사용하는 $(dV/dt)_c$ 값들이 실제 기울기값이 아니고, 단지 상대비교치로써 표시하였다. Fig. 5의 전압파형에서 보듯이 $(dV/dt)_c$ 설정값이 증가함에 따라 감지위치가 전압피크에 가까이 이동하게 된다. 즉 $(dV/dt)_c$ 설정값이 증가할수록 감지시점과 용적이탈시점 사이의 시간적 간격이 좁아지는 것이다. 그 결과 용적이탈 시점에서의 전류치는 $(dV/dt)_c$ 의 영향을 받게된다. $(dV/dt)_c$ 값이 2.5인 경우에는(Fig. 5(a)) 너무 일찍이 전류제어가 시작되어 전류제어가 종료된 이후에 용적이 이탈하게 된다. 즉 용접전류가 베이스전류에서 정상전류로 복귀하는 초기단계에서 용적이 이탈하게 되는 것이다. 따라서 이탈 순간의 전류치는 베이스전류치(210A)보다 높을 수 밖에 없는데, 복귀과정에서의 전류상승속도가 매우 완만하기 때문에 이탈시점에서의 전류치는 약 230A로써 베이스전류치보다 조금 증가한 정도이다. $(dV/dt)_c$ 설정값이 4.7인 경우(Fig. 5(b))에는 용적이탈 시점에서의 전류치가 베이스전류치와 거의 일치하고 있다. 따라서 이 조건에서는 베이스 전류치에서 용적이탈이 이루어지고 있다. 한편 $(dV/dt)_c$ 설정값이 6.0인 경우(Fig. 5(c))에는 감지시점이 전압피크 위치에 너무 근접하여, 전류가 하강하는 초기 단계에서 용적이 이탈하게 된다. 이러한 조건에서는 용적이탈 시점에서의 전류치가 높을 수 밖에 없는데, Fig. 5(c)에서는 이 순간의 전류치가 약 300A이다. 이와같이 유지시간이 일정한 상태에서 $(dV/dt)_c$ 설정값을 변화시키면 용적이탈 시점에서의 전류치가 변화하게 된다. 그리고 이러한 변화는 아크 폭발력에 영향을 주기때문에 스파터 발생량에도 영향을 주게될 것이다.

Fig. 6은 $(dV/dt)_c$ 설정값에 따른 스파터발생량의 변화를 보여 주고 있다. 기타 제어변수는 일정하게 하고(베이스전류는 210A, 유지시간은 0.28msec), 단지 $(dV/dt)_c$ 설정값만을 변화 시키면서 스파터발생량을 측정 한 결과이다. 제어를 적용하지 않은 경우에는 1.8% 수준이었던 스파터 발생량이 제어가 적용되면

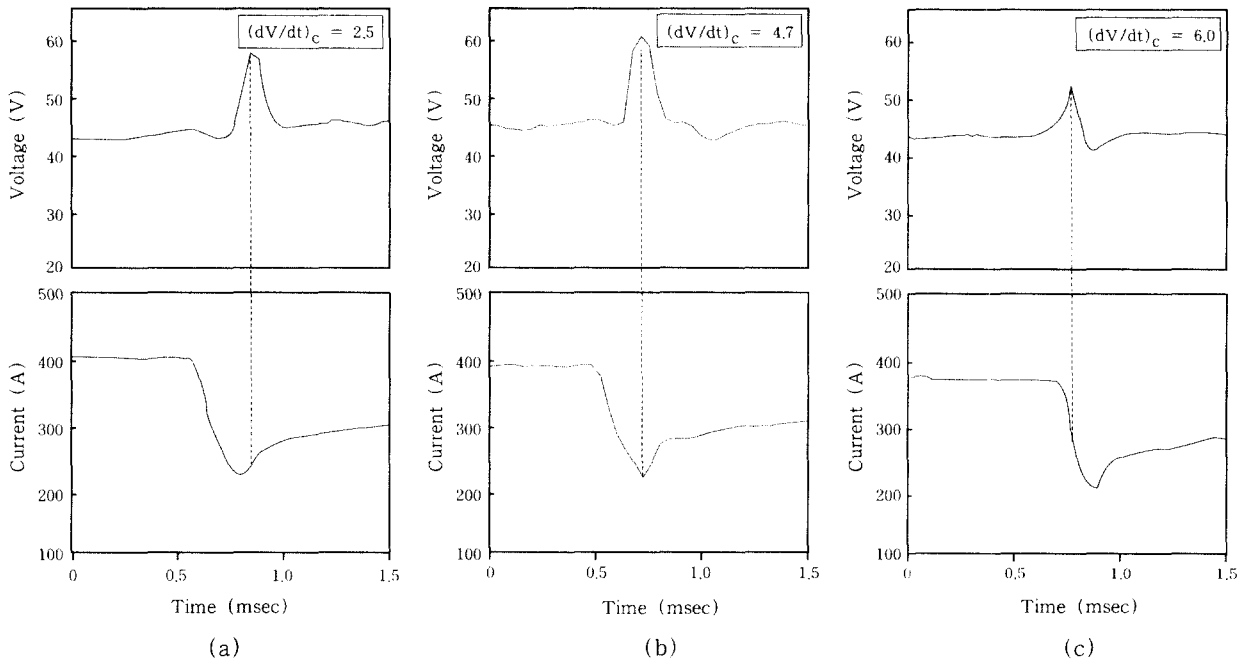


Fig. 5 One-drop waveforms generated by three different levels of $(dV/dt)_c$

1.1~1.5% 수준으로 저하하였다. 그리고 $(dV/dt)_c$ 설정값이 4.7 이하의 조건에서는 1.1~1.3% 수준을 보여 주었으며, 4.7 이상으로 증가하면 다소 증가하는 경향을 보여 주었다. 이와같이 $(dV/dt)_c$ 설정값에 따라 스파터 발생량이 변화하는 현상은 다음과 같이 설명할 수 있다. $(dV/dt)_c$ 설정값이 2.5에서 4.7 사이에 있는 조건에서는, Fig. 5의 (a)와 (b)에서 보듯이, 용적이탈 시점에서의 전류치가 $(dV/dt)_c$ 값의 영향을 거의 받지 않는다. 즉 $(dV/dt)_c$ 설정값이 2.5에서 4.7 사이에 있는 조건에서는 피크전압에서의 전류치가 거의 동일하기 때문에 스파터발생량에 있어서도 변화가 거의 없었다고 생각된다. 그러나 $(dV/dt)_c$ 설정값이 6.0인 경우에는 Fig. 5의 (c)에서 보여주는 바

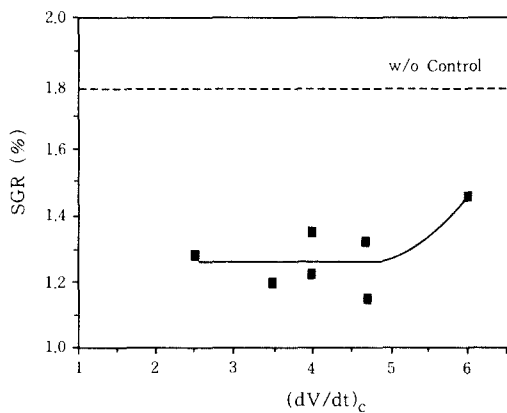


Fig. 6 Variation of spatter generation rate(SGR) with $(dV/dt)_c$

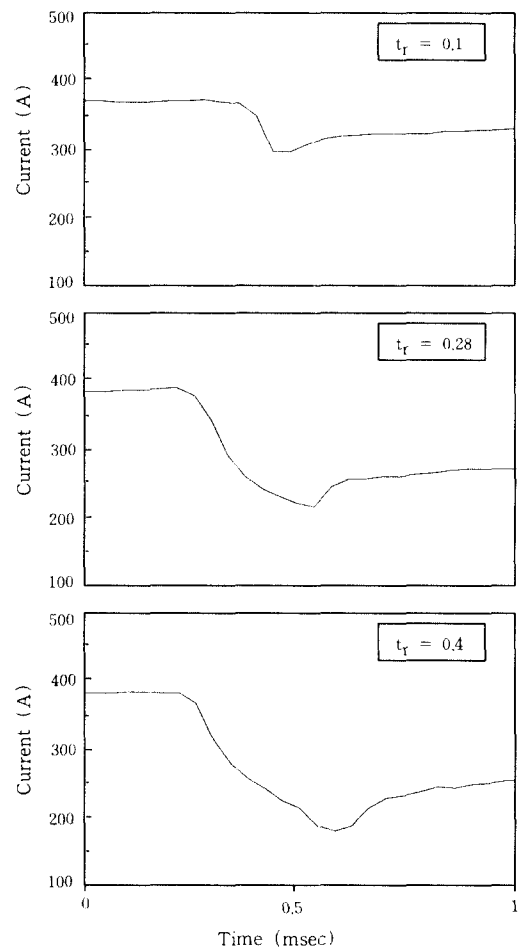


Fig. 7 Variation of current waveforms with three different retention times, t_r

와 같이 보다 높은 전류상태(300A 수준)에서 용적이 탈이 이루어 지고 있어서 스패터 발생량이 증가하는 것으로 생각된다.

4.3 유지시간(t_r)의 영향

유지시간(t_r)은 Fig. 3에 표기하였듯이 전류가 하강하는 시점부터 전류가 상승하기 시작하는 시점까지를 의미한다. 이 시간 동안에 전류는 베이스전류로 하강하고 이어서 추가적인 전류강화과정을 거친다. 전류가 베이스전류에 이르는데 소요되는 시간이 0.28msec 이기 때문에 유지시간이 0.28msec 보다 짧으면 베이스전류에 도달하기도 전에 전류제어가 종료되어 전류

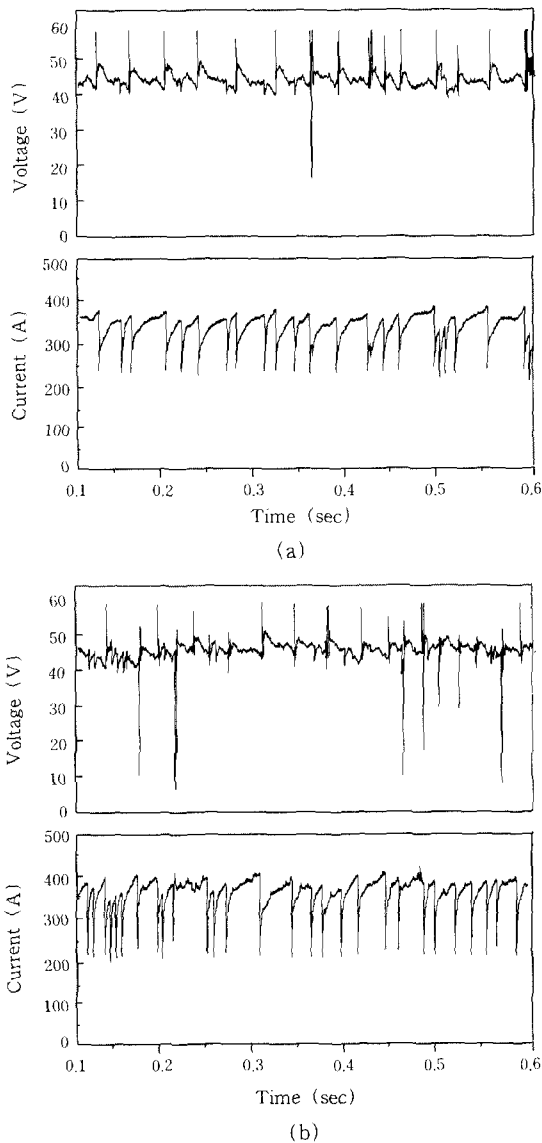


Fig. 8 Variation in multi-drop waveforms generated with two different retention times : (a) $t_r = 0.28\text{msec}$, and (b) $t_r = 0.4\text{msec}$

는 상승하게 된다. Fig. 7은 베이스전류를 210A로 설정한 상태에서 유지시간의 변화가 전류파형에 미치는 영향을 보여주는 시험결과이다. 유지시간이 0.1msec 인 경우에는 전류가 베이스전류에 이르지 못한 상태에서 전류제어가 해지되어 최저전류치는 약 300A에 이른다. 결국 유지시간이 0.28msec 보다 짧으면 베이스전류제어 기능은 유효하지 않을 뿐만 아니라 높은 전류상태에서 용적이탈이 이루어 지게 되는 것이다. 한편 유지시간이 0.4msec인 조건에서는 Fig. 7(c)에서 보여 주는 바와 같이 추가적으로 약 30A 정도의 전류강화가 발생하기 때문에 최저전류는 보다 낮아지게 된다.

Fig. 8은 유지시간에 따른 전압 및 전류파형의 변화를 거시적으로 보여 주고 있는데, 먼저 전류파형을 보면 $t_r = 0.28\text{msec}$ 조건에서 최저전류가 평균 210A이던 것이 $t_r = 0.40\text{msec}$ 조건에서는 평균 약 190A로 저하되어 있다. Fig. 9는 유지시간에 따른 최저전류치의 변화를 보여주는 결과인데, 유지시간이 증가함에 따라 최저전류치는 지속적으로 낮아지고 있다. 한편 Fig. 8의 전압파형을 서로 비교하여 보면 유지시간이 증가함에 따라 순간단락 회수가 크게 증가하고 있을 알 수 있다. 이러한 현상을 앞에서 설명한 제어 개념과 연관시켜 생각해 보면 다음과 같이 설명할 수 있다. 먼저 저전류 상태에서는 용적이 작용하는 반발력이 감소하기 때문에 용적은 중력에 의해 용융풀 쪽으로 처지게 될 것이라고 예상된다. 그리고 저전류 상태에서 유지되는 시간이 길어지면 용적과 용융풀 사이의 거리가 보다 가까워지기 때문에 순간단락이 발생할 가능성이 크게 증가하게 되는 것이다. 더구나 유지시간이 증가하면 추가적인 전류강화가 수반되어 반발력이 더욱 감소하기 때문에 순간단락이 발생할 확율은 보다 높아지게 된다. 이러한 원인으로 인하여, 무제어 상태에서는 순간단락이 분당 약 20회 정도 발생하던 것이 유지시간이 증가함에 따라 지속적으로 증가하여 $t_r = 0.40\text{msec}$ 에서는 약 100회에 이르고 있다. 이 상에서 설명한 바와 같이 유지시간은 최저전류치 뿐만 아니라 순간단락 발생 빈도수에도 영향을 주게 되는데, 이러한 영향을 Fig. 9에서 종합적으로 보여주고 있는 것이다.

순간단락은 스패터 발생을 조장하는 현상이므로 이를 최소화 할 필요가 있는데, 이를 위해서는 유지시간을 짧게 설정할 필요가 있다. 그러나 유지시간을 너무 짧게 설정하면 용적이 이탈되기도 전에 제어가 해지되어 제어 효과가 감소하게 된다. 따라서 적정 유지시간이 있을 것으로 예상되는데, 그러한 경향을 Fig. 10에서 확인할 수 있었다. Fig. 10은 전압감지순간변화를

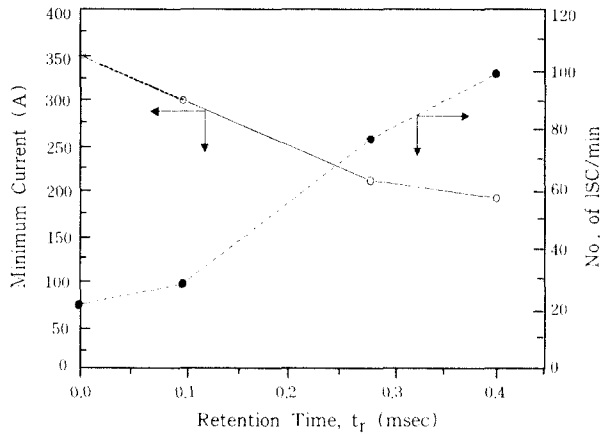


Fig. 9 Effect of retention time(t_r) on the minimum current and the frequency of instantaneous short circuit(ISC)

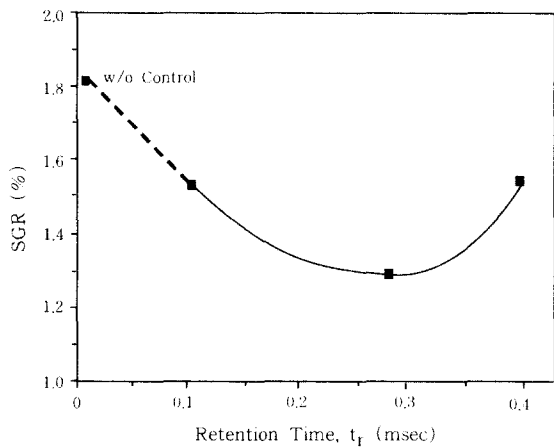


Fig. 10 Effect of the retention time(t_r) on the spatter generation rate(SGR)

을 4.7로하고, 베이스전류를 210A로 일정하게 한 상태에서 단지 유지시간만을 변화시키면서 스파터발생율을 측정 한 시험결과이다. 이 결과에서 보듯이 t_r=0.28msec의 조건에서 스파터발생량은 최소치를 보여주고 있다. t_r=0.28msec까지는 유지시간이 증가할수록 최저전류치가 감소하여 제어효과가 활성화되지만, 유지시간이 0.28msec 이상으로 증가하게 되면 순간단락에 의한 부정적인 효과가 나타나게 되어 스파터 발생량은 증가하게 되는 것이다.

4.4 베이스전류(I_{base})의 영향

유지시간을 0.28msec로 고정 한 상태에서 스파터 발생량에 미치는 베이스전류의 영향을 Fig. 11에서 보여 주고 있다. 본 실험은 (dv/dt)_c가 4.0과 4.7로 설정된 조건에서 실험한 결과인데 두 경우 모두 유사한 경향을 보여 주었다. 제어개념에서 보면, 베이스

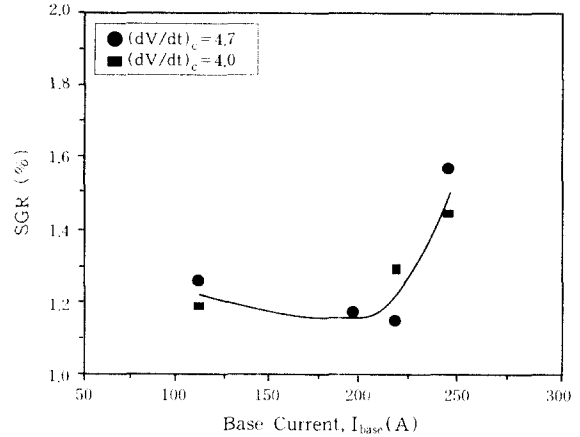


Fig. 11 Effect of the base current on the spatter generation rate(SGR)

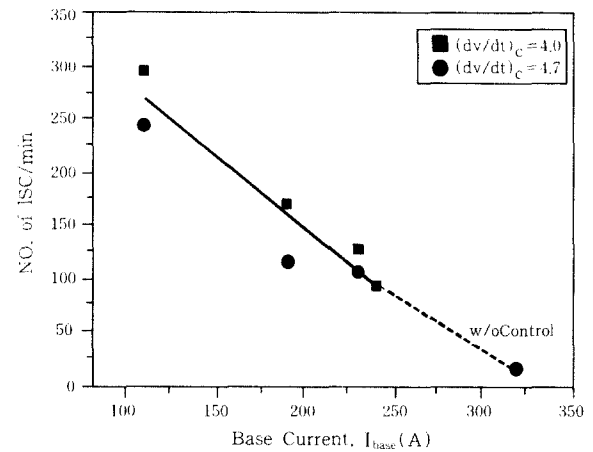


Fig. 12 Effect of the base current on the frequency of instantaneous short circuit(ISC)

전류가 낮을수록 아크폭발력이 감소하기 때문에 스파터 발생량은 감소하여야한다. 그런데 베이스전류가 190A 이하에서는 그러한 영향을 보여주지 않고 있다. 그 원인을 규명하고자 파형을 분석하여 본 결과, 베이스 전류가 저하할수록 순간단락의 발생빈도수가 Fig. 12와 같이 급격히 증가함을 알 수 있었다. 즉 저전류측에서는 아크폭발력의 강도가 저하하기는 하지만 순간단락에 의한 스파터발생이 조장되어 본 연구에서 추구하는 제어효과가 저하되는 것으로 생각된다. 따라서 본 제어기법을 적용함에 있어서 최적의 베이스 전류값은 순간단락 발생빈도수를 고려하여 설정되어야 할 것이다.

4.5 스파터 크기 비교

파형제어가 스파터 크기에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 채취한 모든 스파터를 크기에 따라 분류하였다. Table 1은 분류한 시험결과를 보여 주고 있는데,

파형제어가 적용되면 스파터의 크기가 작아지고 있음을 확인할 수 있었다. 특히 크기가 1mm 이상인 대립의 스파터가 차지하는 비율이 27.6%에서 16.9%로, 약 10% 정도 감소하였음을 보여 주었다. 이러한 결과도 아크폭발력이 감소하기 때문에 얻어지는 결과라고 할 수 있다. 결국 본 연구에서 제안하는 파형제어기법은 스파터발생량을 저감시키는 효과 이외에도 스파터의 크기를 미세화하는 부수적인 효과도 부여하고 있는 것이다.

Table 1 Size distribution of weld spatter

Saptter size	without waveform control		with waveform control	
	g/min	%	g/min	%
over 1mm	0.61	27.6%	0.27	16.9%
0.5mm~1mm	0.48	21.7%	0.37	23.1%
0.1mm~0.5mm	1.02	46.2%	0.88	55%
less than 0.1mm	0.1	4.5%	0.08	5%
Total	2.21g/min	100%	1.6g/min	100%

(*) control condition (dV/dt)_c=4.7, t_r=0.28msce, I_{base}=210A

5. 결 론

입상용적이행이 나타나는 고전류 CO₂용접에서 스파터 발생량을 절감할 수 있는 파형제어 개념과 최적의 기법을 개발하였다. 제어개념은 스파터 발생순간에 스파터 발생원인을 최소화하는 것이다. 반발이행에 있어서 스파터 발생순간은 용적이탈 시점이며, 발생원인은 아크 폭발력인바, 제어기법은 이탈순간의 전류상태를 되도록 낮게 유지하여 아크폭발력을 최소화하는 것이다. 그런데 제어변수의 변화에 따라 스파터 저감효과에 있어서 차이를 보여 주었는데, 이들의 영향 및 최적조건은 다음과 같다.

1) 전압감지 순간변화율이 일정 수준 이상이 되면 용적이탈 시점에서의 전류치가 상승하여 스파터 저감효과가 감소하였다.

2) 베이스전류가 낮을수록 스파터발생량은 감소하나 일정수준 이상이 되면 순간단락이 발생하는 빈도수가 증가하여 스파터발생량이 증가한다.

3) 저전류상태에서의 유지시간이 증가할수록 스파터 발생량은 감소하나 일정수준이상이 되면 순간단락이 발생하는 빈도수가 증가하여 제어의 효과가 감소하였다.

4) 최적의 제어조건은 용적이탈 순간의 전류치를 최소화 하면서도 순간단락의 생성을 최대한 억제할 수 있는 조건이 되어야한다. 본 연구에서는 최적의 조건에서 용접스�파터 발생율이 약 30% 이상 저감되었다.

감사의 글

본 연구는 산업기반기술 조성사업의 일환으로 수행되었기에 산업자원부 및 산업기술평가원 관계자들에게 감사하며, 시험 및 그림편집을 도맡아 하여 주신 전동술님께 감사드립니다.

참고 문헌

1. 이성근, 서성필 : 스텐리스강 용접의 스파터에 관한 연구, 대한용접학회지, 제2권, 제2호(1984), 13
2. 강봉용, 김희진 : CO₂ 용접의 스파터 발생에 미치는 용적이행 모드의 영향, 대한용접학회지, 제15권 제2호(1997), 72
3. M. Sugisaki, M. Kosyou : Adoption of spatterless wire : Welding Technique, Vol. 44, No. 11(1996), 10
4. 안영호 : CO₂용접 스파터발생에 미치는 미량원소의 영향, 대한용접학회 추계학술발표 개요집(1990), 14
5. 안영호, 방국수, 이종봉, 장래용 : GMAW 용적이행현상에 미치는 Ca의 영향, 대한용접학회지, 제12권, 제4호(1994), 424
6. M. Sakashita, T. Kataoka : KM-50S spatterless wire for gas shielded arc welding, Kawasaki Steel Technical Report, No. 33, Jan. (1996), 17
7. 안영호, 이종봉, 최원규, 엄동석 : MAG용접의 spatter 발생 및 아크현상에 미치는 S의 영향, 대한용접학회 1999년도 춘계 학술발표대회 개요집, 150
8. 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), 190
9. T. Ito, F. Koshiishi, M. Sato, T. Suga, M. Ushino : A study on spatter reduction in pulsed CO₂ gas shielded arc welding, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol. 15, No. 3(1997), 432
10. P. Boughton, G.J. MacGregor : Control of short circuiting in MIG-welding, Welding Research International, Vol. 4, No. 2(1974), 31
11. 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), 57
12. T. Mita : Waveform control method in CO₂ gas shielded arc welding, Quarterly J. of Japan Welding Society, Vol. 6, No. 2(1988), 209
13. 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)
14. Lincoln Electric : 스파터를 감소시키기 위한 단락형 용접시스템 제어 방법 및 장치, 대한민국 특허 공고번호 91-1003(1991)
15. E. K. Stava : The surface-tension-transfer power source : A new low-spatter arc welding machine, Welding Journal, Vol. 72, No. 1(1993), 25
16. H. Yamamoto : Recent advances in the welding power systems for automated welding, Journal of the Japan

- Welding Society, Vol. 64, No. 6(1995), 45
17. 이창한, 김희진 : CO₂ 용접에서 스파터 발생에 미치는 지연시간 제어의 영향, 대한용접학회지, 제17권 제5호(1999), 61
 18. CO₂ MAG 용접기 SENSARC LS350, KOBE 기술 Guide, Vol. 37, No. 330(1997), 8
 19. 김희진, 이창한 : GMA 용접전원의 파형제어 기법 분석, 대한용접학회지, 제16권 제5호(1998), 39
 20. 김희진, 이창한 : GMA 용접전원의 최신 파형제어 기법 분석, 대한용접학회지, 제16권 제6호(1998), 26
 21. 대전류 범위에서 스파터 저감이 가능한 파형제어 기술개발, 산기반 기술개발사업 중간보고서 (2001)
 22. 김희진, 이창한: 인버터 용접기에서의 입상용적이행 제어장치, 특허출원중