

研究論文

CO₂ 용접에서 전류 펄스 조건이 스파터 발생에 미치는 영향

강덕일* · 최재호** · 장영섭*** · 김용석****

The Effect of Current Pulsing Parameters on the Spatter Generation Rate during CO₂ Shielded Gas Metal Arc Welding

D. I. Kang*, J. H. Choi**, Y. S. Jang*** and Y. S. Kim****

Key Word : GMAW(가스 메탈 아크 용접), Metal Transfer(금속 이행), Short Circuit Transfer(단락 이행), Repelled Transfer(반발 이행), Pulsing Parameter(펄스 변수)

Abstract

In this study, the effects of the current pulsing conditions on the spatter generation rate during the CO₂ gas metal arc welding (GMAW) were investigated. Normally using the inverter type power supply, of which the welding current waveform was regulated to reduce the spatter generation rate, but in this study pulsing was imposed on the welding current. Observation of the metal transfer phenomena during the pulsed current GMAW indicated that the droplet transfer from the electrode via the short circuit transfer and the repelling transfer mode could be minimized by selecting optimum combinations of pulsing parameters, which include base and peak current, base and peak duration. It was also demonstrated in this study that proper combinations of the pulsing parameters led to reduce generation of spatters during GMAW shielded by CO₂ gas.

1. 서 론

중공업 분야에서 CO₂가스를 보호 가스로 하는 GMAW(Gas Metal Arc Welding)법이 많이 사용되

는데, 이는 CO₂가스가 다른 가스에 비해 가격이 저렴하고 용입이 상대적으로 깊기 때문이다.

그러나 CO₂가스를 보호 가스로 사용하는 경우, 용적이행(drop transfer)이 단락이행(short-circuit transfer)과 반발 이행(repelled transfer)에 의한 많

※ 1998년 1월 30일 접수

* 비회원, 홍익대학교 금속·재료공학과

** 학생회원, 홍익대학교 금속·재료공학과

*** 정회원, 서울검사부설 기술연구소

**** 정회원, 홍익대학교 금속·재료공학과

은 스파터의 발생이 용접 품질과 생산성을 저하시키는 문제점이 있다.¹⁻³⁾ 용융된 용접봉이 모재와 단락을 이루면서 이행이 진행되는 단락 이행 모드에서는 용입이 얇기 때문에 박판 용접에 많이 사용되는데, 이 경우 용접봉이 모재에 접촉하는 순간과 단락이 파단되는 순간에 많은 스파터를 발생시키는 것이 문제점으로 지적되어 왔다.¹⁻³⁾ 반발 이행(repelled transfer)은 아크 반발력 또는 전자기력에 의하여 발생하는 것으로 알려져 있는데¹⁾, 이러한 용융된 용접봉에 작용하는 힘은 정상적인 용적 이행을 방해하여 스파터를 생성시키는 것으로 알려져 있다.

따라서 전류 파형 제어에 의한 스파터 발생을 억제하기 위한 연구가 활발하게 진행되어 인버터형의 용접기가 개발되어 현장에서 스파터 발생 억제에 상당한 효과를 얻고 있다. 한 예로서 Fig. 1과 같이, 단락 이행이 이루어지는 단계를 6단계로 구분하여, 각 단계에 적절한 전류 및 전류 출력 변화량(di/dt)을 조절하여 스파터 발생을 제어하고자 하였다.³⁾ 먼저 용융된 용접봉이 모재와 단락을 형성하면 접촉에 의하여 용접 전류가 증가하게 되는데, 전류의 증가 속도를 기 설정된 값으로 유지하여 과도한 용접 전류 증가에 의한 단락부의 폭발적인 파단을 억제하는 것이다. 또한 단락이 파단되어 아크가 재발생하는 경우에도 전류 감소 속도를 특정 속도로 유지하여 적절한 크기의 용적이 형성되도록 유도하여 미소 단락 형성에 의한 스파터를

제어하고자 하였다. (C, D, E부분) 그러나 이러한 파형 제어에 의한 용적 이행의 경우, 용접봉이 모재에 접촉 및 단락 파단시에 발생하는 스파터를 근본적으로 없애는 것이 불가능하고, 반발 이행에 의한 스파터 발생에 대해서는 절감 효과가 나타나지 못하는 단점이 있다

이와같은 접근 방법과는 달리 용접 전류에 펄스를 인가하여, 스파터의 발생을 억제하려는 연구가 일본 연구자들을 중심으로 활발하게 진행되었다⁵⁻⁶⁾. 인가된 전류 펄스에 의하여 발생하는 매우 큰 전자기력으로 용적을 강제로 용접봉으로부터 이행시켜, 단락의 형성에 의해 스파터의 발생을 억제시키려는 개념이다. 그 결과 단락 형성 및 파단시의 스파터 발생을 제어할 수 있는 것으로 나타나, 전류에 펄스를 가하는 방법이 CO₂용접에 있어서 스파터 발생을 제어할 수 있는 수단으로써 가능성을 보여주었다. 이 방법이 실용화되기 위해서는 전류 펄스 조건의 설정에 있어서 실험적인 접근보다 용적 이행 거동에 근거한 과학적인 접근이 요구된다 하겠다.

전류에 펄스를 가하는 경우, 기존의 DCRP(direct current reverse polarity) GMAW용접시의 용접 변수인 용접 전류 및 전압등에 추가하여 Fig. 2에서와 같은 새로운 용접 변수를 결정하여야 할 것이다. 즉 기저 전류(base current)는 반발 이행이 발생하지 않도록 유지하여야 하고, 피크 전류는 용적을 이행시키기에 충분히 높아야 할 것이다. 또한 CO₂가스가 보호가스인 경우, 가스의 이온화 에너지가 아르곤과 같

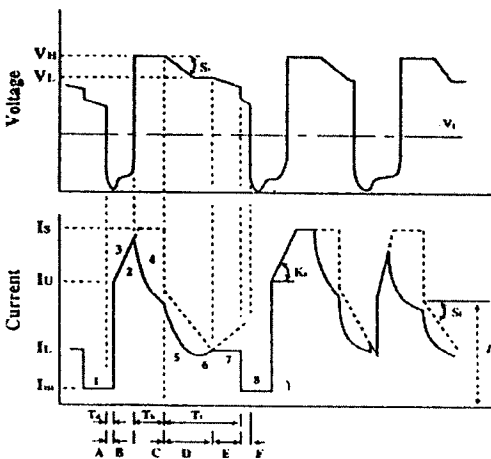
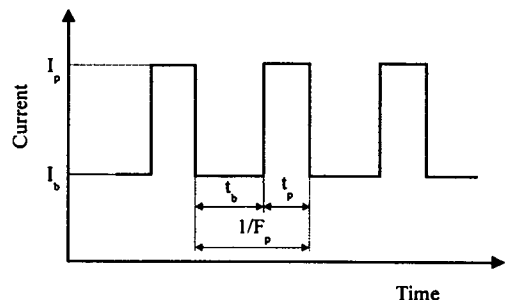


Fig. 1 Schematic diagram of current wave for short circuiting mode.



I_p : Peak Current I_b : Base Current
 t_p : Peak Current Duration Time
 t_b : Base Current Duration Time
 F_p : Pulse Frequency

Fig. 2 Schematic diagram of current wave for pulsed Current GMAW.

은 불활성 가스보다 높기 때문에 용접 전류가 낮은 경우에는 아크가 쉽게 소멸되는 문제점이 있다. 따라서 기저 전류인가 동안에 아크의 안정성을 확보할 수 있을 정도의 펄스 주기를 인가하여야 할 것이다. Shimada와 Gotoh에 의하면 펄스의 주기를 높게 인가하게 되면 안정된 아크를 얻어지는 것으로 나타났다⁶⁾. 따라서 본 연구에서는 전류에 펄스를 인가하였을 경우, 펄스 인자들이 CO₂ 용접시 스파터의 발생 정도에 미치는 영향을 분석하여 스파터 발생을 제어하고자 하였다.

2. 실험 방법

본 실험에서 사용된 실험 장치의 모식도는 Fig. 3과 같다. 용접기는 최대 펄스 주기를 1KHz까지 인가할 수 있는 인버터 타입의 450A용접기(L-TEC사 제품, USA)를 사용하였다. 용접 전류는 hall sensor를 이용하여 측정하였으며, 용접 전압은 용접기 단자에서 직접 측정하였다. 이렇게 측정된 용접 전류와 전압은 cut-off 주기가 10 kHz인 low pass filter로 noise를 제거한 후, data acquisition system으로 데이터를 저장 및 연산을 하였다.

용적 이행 현상을 직접 관찰하기 위해서 laser back lightening system (LBS)을 이용하였다. 배광으로 파장이 637nm인 He-Ne 레이저를 이용하였고, 렌즈 어레이에 의하여 적절하게 상을 확대한 후, 초당400프레임의 속도로 촬영할 수 있는 고속 비디오 카메라를 이용하여 용적 이행 현상을 관찰하였다. 본 실험에서 사용된 용접 모재는 300×60×3mm의 연강(mild steel)을 사용하였으며 보호 가스로는 100% CO₂가스를 이용하였고 bead on plate방법으로 용접을 행하였다. 용접봉은 ER70S-

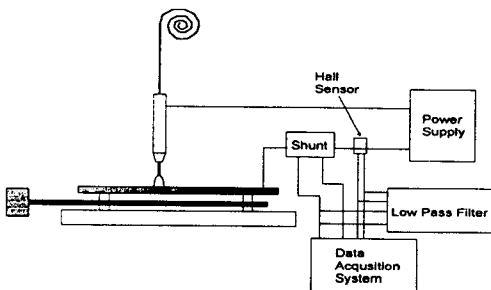


Fig. 3 Schematic diagram of experimental equipment.

6 규격 1.2φmm 와이어를 사용하여 용접을 수행하였고 또한 용접봉 공급속도는 270IPM(inch per min.)으로 가스 유량은 60CFH(cubic feet per hour)로 용접 속도는 1.2 m/min으로 용접을 행하였다. 스파터 발생량은 스파터 포집기 내에서 25cm용접후 포집하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1. CO₂ 용접에서 스파터 발생 기구 및 현상

먼저 CO₂가스 DCRP GMAW에서 스파터가 발생하는 주요 양상을 고속 비디오를 이용하여 관찰하였다. Fig. 4-a)는 단락이 파단되어 아크가 재점화되는 순간의 사진인데, 용접봉 선단의 용적이 아크 압력에 의하여 반발되면서 미세한 스파터를 발생시키는 것을 볼 수 있다. Fig. 4-b)는 용접봉이 단락을 형성하기 직전 용융지(molten pool)에 접근할 때, 아크 압력에 의해 용융지에서 미세한 스파터가 발생하는 것을 나타내고 있다. Fig. 4-c)는 용접 전류가 350A 이상의 고전류 영역에서 관찰되는 용접 현상으로, 단락이 파단되어 아크가 재 점화되면서 높은 전자기력에 의하여 rotationing 이행되면서 스파터를 발생시키는 현상을 보여주고 있다. 이는 고전류에 의한 단락부분에서 kink instability에 의해 발생하는 것으로 추정된다.⁷⁻⁸⁾ 마지막으로 Fig. 4-d)는 아크의 반발력에 의하여 용적의 반발 이행이 발생하는 것을 보여주고 있는데, 이때에는 용적 크기에 해당하는 스파터가 발생하게 된다.

이와같은 스파터의 발생 거동을 각 용접 조건마다 고속 비디오를 이용하여 파악하는 것은 매우 많은 데이터의 수집과 통계적인 분석을 요구한다. 따라서 본 연구에서는 용접 전류와 전압과의 관계 곡선을 이용하여, 용적의 이행 특성과 스파터의 발생 거동을 분석하고자 하였다. 단락 이행이 발생하는 용접 조건에서 용접 전류와 전압과의 관계를 모식적으로 나타내면 Fig. 5와 같이 나타내게 될 것이다.

즉 용접봉이 용융지로 접근하면 아크의 길이가 감소하여 전압이 감소하고, 이에 따라 전류가 약간 증가하는 현상을 나타내게 될 것인데, 이 구간이 A-B구간으로 나타내게 될 것이다. 다음으로 용

접봉이 용융지와 접촉하여 단락이 형성되면, 아크 저항이 없기 때문에 전류가 급격히 증가하게 될 것

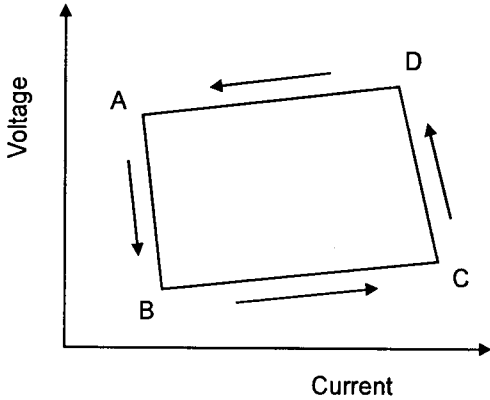


Fig. 5 Schematic diagram of relationship of welding current and voltage.

인데, 이 구간이 B-C구간이다. 이때 전압이 증가하는 것은 용접봉의 저항에 의하여 발생하는 현상이다. 다음으로 아크가 재 점화되면, 아크 저항에 의하여 전압이 상승되는데(C-D구간), 이때 용접 전류는 약간 감소하고, 이 기울기는 용접기의 특성에 의하여 좌우되게 된다. 마지막으로 용접봉이 높은 전류에 의해 burn-back하게 되어 정상적인 아크길이가 형성되는 구간이 D-A구간이다. 용적 이행 과정이 규칙적으로 발생하는 경우에는 이러한 용접 전류-전압 폐곡선이 일정한 궤적을 이루게 될 것이다. 따라서 이러한 폐곡선을 관찰함으로써 단락의 발생정도, 용적의 규칙적인 이행 정도를 정성적으로 파악하는 것이 가능하여 적정 용접 조건을 설정하는데 지표로서 사용하는 것이 가능하게 될 것이다.

Fig.6은 보호가스로 CO₂가스 또는 100% Ar가스를 이용할 때, DCRP 단락 이행 모드 조건에서 용

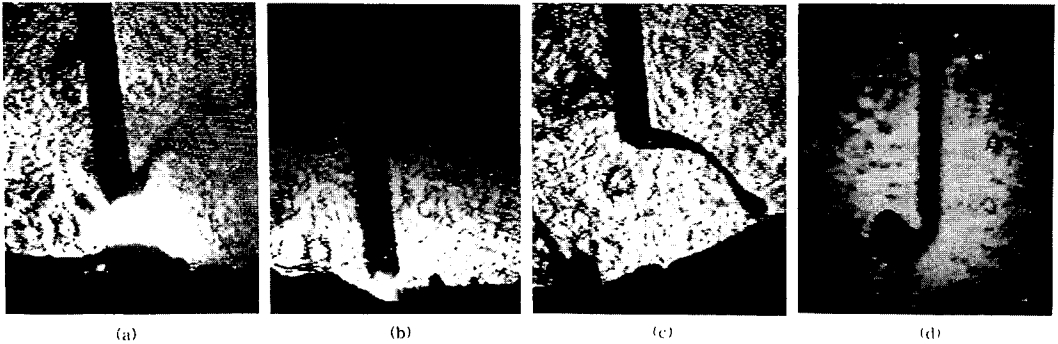
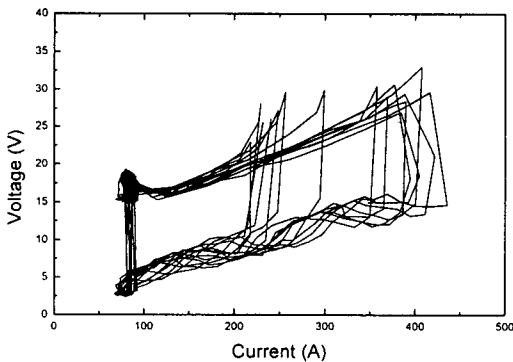
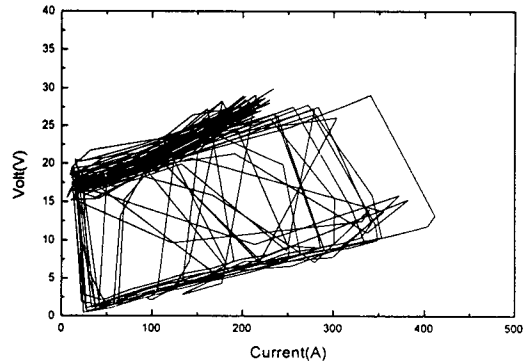


Fig. 4 The photographs of spatter generation.



(a) Ar gas



(b) CO₂ gas

Fig. 6 Schematic diagram of welding current-voltage for shielding gas.

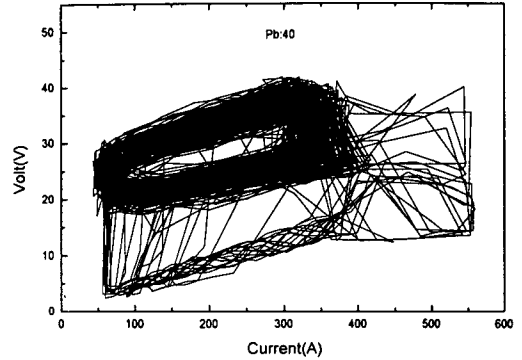
접 전류와 용접 전압과의 관계를 나타낸 것이다. 이때 평균 용접 전류는 123A이었고, 와이어 송급 속도는 1.4m/min이었다. 이 경우, 앞의 Fig.5와 유사한 용접 전류-전압 궤적을 나타내는 것을 알 수 있는데, Ar 가스를 보호가스로 사용한 경우에는 용적 이행이 비교적 규칙적으로 이루어지는 것을 볼 수 있다. 이에 비하여 CO₂가스를 보호가스로 사용한 경우에는 폐곡선의 내부가 불규칙하게 채워져 있어, 용적 이행이 매우 불규칙하게 발생하는 것을 추정할 수 있다.

3.2 용접 전류의 펄스 조건이 용적 이행에 미치는 영향

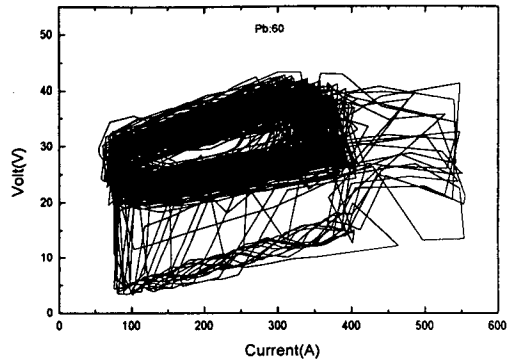
용접 전류에 펄스를 인가하는 목적은 앞의 Fig.6과 같은 단락 이행이 발생하지 않게 하기 위함이다. 즉 용접봉에 고전류의 펄스를 인가하여, 용적을 용융지와 접촉하기 전에 이탈시켜 단락 이행의 발생을 억제하는 것이다. 펄스가 인가된 GMAW의 용접 조건을 설정하기 위해서는 DCRP GMAW의 용접 조건과는 다른 피크 전류, 기저 전류, 피크 시간 및 펄스 주기등의 변수를 결정하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 이들 변수들이 전류-전압 궤적에 미치는 영향을 파악하고자 하였다.

Fig.7은 기저 전류의 변화에 따른 용접 전류와 용접 전압의 관계를 나타내는 것이다. 기저 전류를 40에서 80A까지 변화시켰고, 피크 전류는 400A로 고정하였다. 이때 펄스 주기는 303Hz이었고, 피크 시간은 1.4msec로 유지하였다. 전류-전압 궤적을 살펴보면, 두가지 유형의 전류-전압 궤적을 나타내고 있는 것을 볼 수 있다. 즉 용적 이행이 자유 이행되는 궤적(굵은 궤적)과 단락 이행이 발생하는 궤적(용접 전압이 0 가까이 근접하는 궤적)으로 혼재되어 있는데, 대부분의 용적 이행이 자유 이행되고, 일부분이 단락 이행에 의하여 발생되고 있음을 볼 수 있다. 그러나 기저 전류를 40A에서 80A까지 변화시켜도, 단락 이행의 빈도에는 크게 영향을 주지 않는 것을 볼 수 있다. 스파터의 발생량은 기저 전류의 증가에 따라서 약간 증가하는 현상이 관찰되었다. (Fig.8)

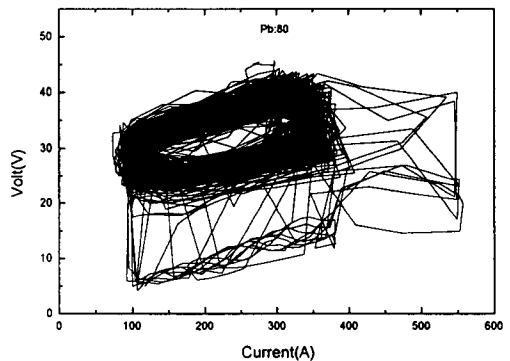
피크 전류 인가 시간을 증가시킴에 따라서 전류-전압의 궤적 변화를 Fig.9에 나타내었다. 이때 기저 전류는 80A로 유지하였고, 펄스 주기는 303Hz로



(a) 40A



(b) 60A



(c) 80A

Fig. 7 The relationship of welding current-voltage for base Current.

유지하였다. 피크 전류 인가 시간이 증가함에 따라 단락 이행이 발생하는 전류-전압 궤적의 밀도가 감

소하여, 인가 시간이 1.8msec 이상에서는 단락 이 행이 발생하지 않는 것을 볼 수 있다. 이때 용적 이 행 거동을 고속 비디오 카메라를 이용하여 관찰한 결과, 용적 이 행이 단락 이 행 모드에서 입적 이 행

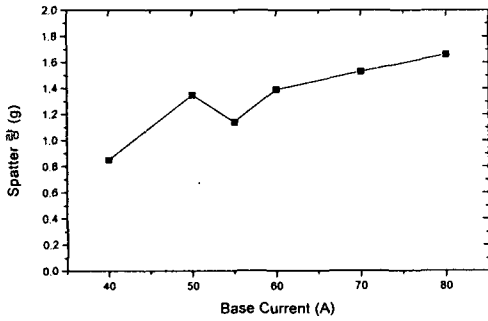


Fig. 8 Spatter generation of base current.

모드 (globular metal transfer mode)로 Fig. 10과 같 이 천이해 가는 것을 관찰할 수 있었다. 특히 피크 전류 인가 시간이 2.2msec 이상으로 증가함에 따라

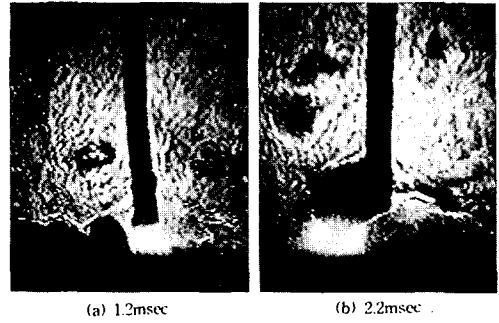
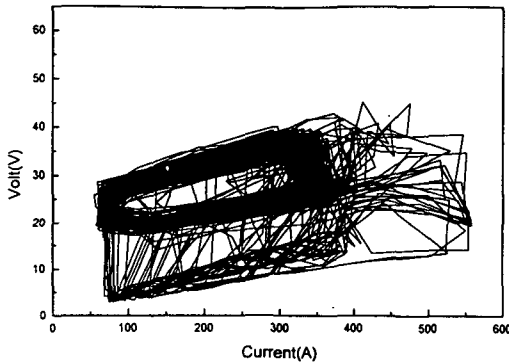
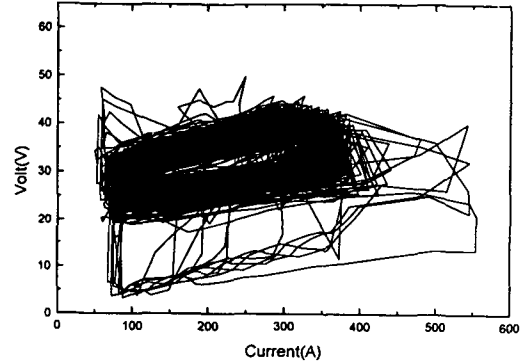


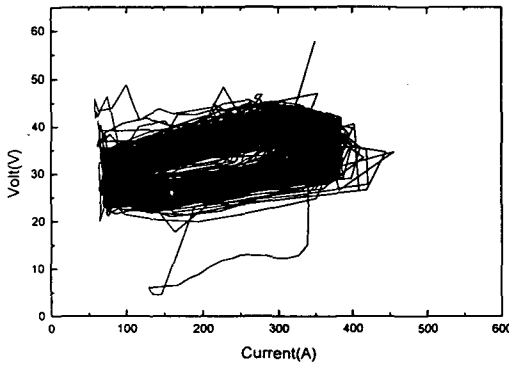
Fig. 10 The shape of droplet for peak current duration time.



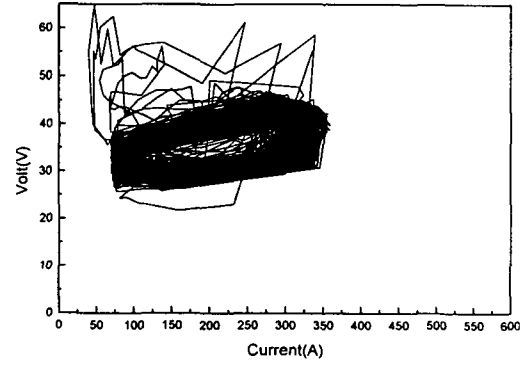
(a) 1.2msec



(b) 1.6msec



(c) 1.8msec



(d) 2.2msec

Fig. 9 The relationship of welding current-voltage for peak current duration time.

서 반발 이행 모드의 경향이 증가하는 현상이 관찰되었다. 이것은 피크 전류 인가 시간이 증가함에 따라서 피크 전류에 의해 발생하는 반발력 (repelling force)이 그만큼 용적에 오래 작용하기 때문이라고 생각된다. 한편, 피크 전류 인가 시간에 따른 스패터 발생량을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 보면 단락 이행 거동이 발생하는 영역 (인가시간 < 1.6msec)에서는 인가시간이 증가함에 따라 스패터의 양이 약간 증가하다, 자유 이행이 발생하는 영역에서는 스패터의 발생 정도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 피크 전류 인가 시간이 2.2msec에서는 1.8msec에 비하여 감소한 것으로 나타났는데, 실제 용접 상태를 관찰한 결과, 반발 이행 (repelled transfer)에 의한 매우 큰 스패터가 용접부 주위에 형성되어 있는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 큰 스패터들이 용접 모재에 부착되어 큰 스패터들을 측정할수 없었다.

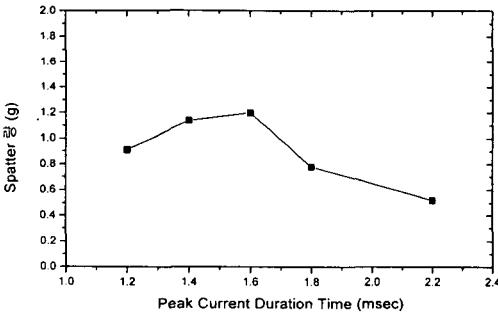
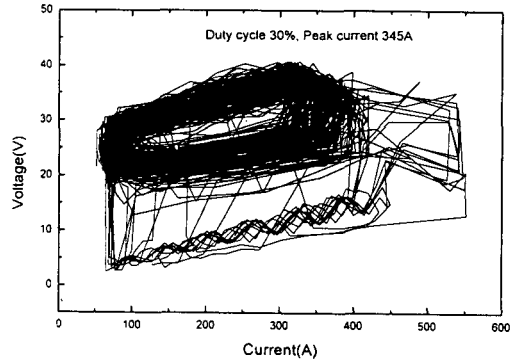
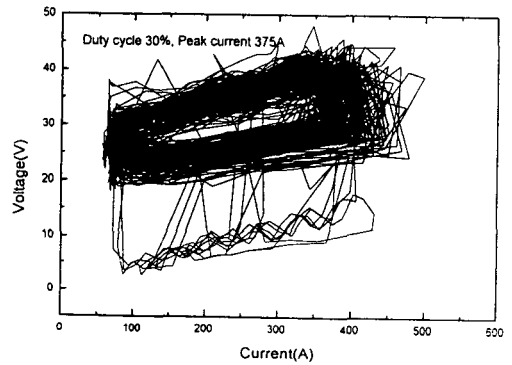


Fig. 11 Spatter generation of peak current duration time.

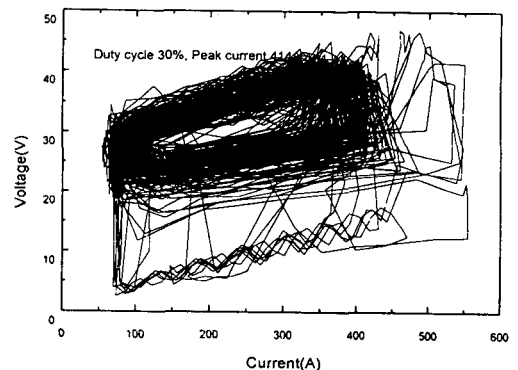
Fig. 12는 피크 전류를 345A에서 414A까지 변화 시킴에 따라서 용접 전류-전압 변화 궤적을 나타낸 것이다. 이때 기저 전류는 80A, 피크 전류 인가 시간은 1.4msec, 펄스 주기는 303Hz로 유지하였다. 그림에서 살펴보면, 피크 전류가 증가하여도, 전류-전압 궤적은 크게 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 이는 피크 전류가 증가함에 따라 용적에 작용하는 아크의 반발력은 증가하나 용적의 크기가 작아 용적이 반발되는 정도가 작은 것으로 생각된다. 그러나 피크 전류의 증가에 따른 스패터 발생량은 증가하는 것으로 나타났는데 (Fig. 13), 이것은 아크 반발력의 증가에 의한 반발 이행 (repelled transfer) 거동의 증가에 의한 것으로 고속



(a) 345A



(b) 375A



(c) 414A

Fig. 12 The relationship of welding current-voltage for peak current.

비디오 카메라를 통하여 관찰되었다.

다음으로 펄스 주기에 따른 전류-전압 궤적 곡

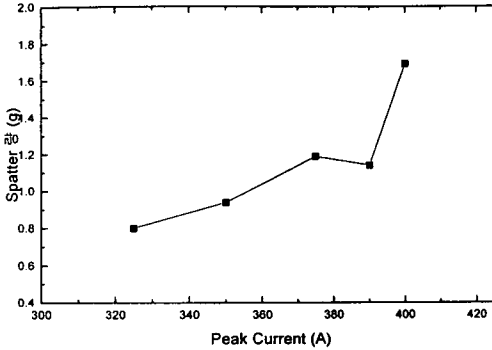
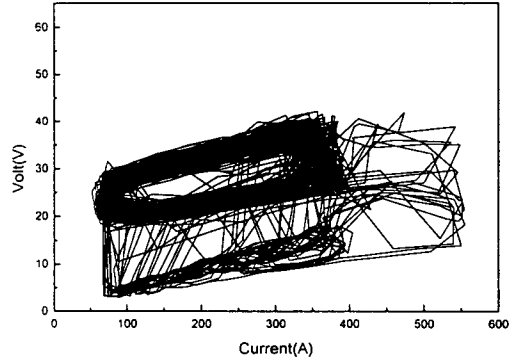


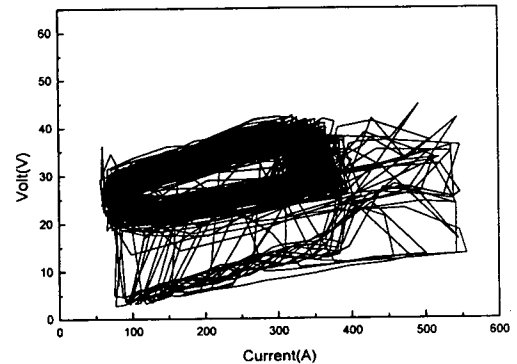
Fig. 13 Spatter generation of peak current.

선의 변화를 Fig. 14에 나타내었다. 이 경우, 기지 전류는 80A, 피크 전류는 400A, 피크 전류 인가 시간은 1.4msec로 고정하였다. 그림에서 보면, 펄스 주기가 증가함에 따라서 단락 이행이 발생하는 정도가 감소하는 것을 볼 수 있는데, 고속 비디오 카메라를 통하여 관찰한 결과에 의하면, 이는 단락 이행 행동에서 입적 이행 (globular transfer) 행동으로 천이하기 때문으로 나타났다. 그러나 본 실험에서는 피크 전류 인가 시간을 고정하였기 때문에, 펄스 주기가 증가함에 따라 load duty cycle이 증가하게 될 것이다. 즉, 단위 전류 펄스당 피크 전류가 인가되는 시간 분율이 상대적으로 증가하여, 액적의 반발 정도가 증가되는 것이 관찰되었다. 또한 펄스 주기가 500Hz이상으로 증가하는 경우, 본 실험에서 사용한 용접기의 스위칭 소자의 응답 시간이 느려 인가한 피크 전류가 얻어지지 못하는 것으로 관찰되었다. (Fig. 15) 펄스 주기의 변화에 따른 스파터 발생량은 Fig. 16과 같은데, 펄스 주기가 증가함에 따라서 대체적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이경우에도 펄스 주기가 증가함에 따라서 미세한 스파터의 발생량은 상대적으로 감소하였으나, 반발 이행에 의한 과립의 스파터 발생은 증가하는 것으로 나타났다.

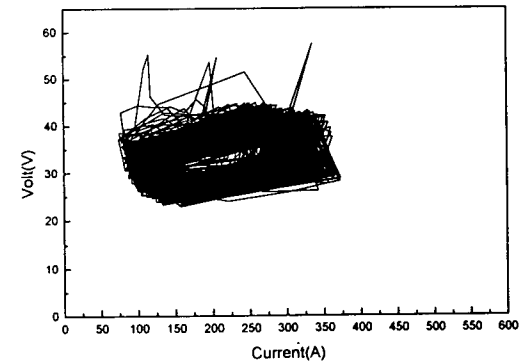
이와 같은 전류 펄스 변수들이 스파터 발생에 미치는 영향을 기초로 하여, 적정 전류 펄스 조건을 설정하였다. 기지 전류를 55A, 피크 전류는 390A, 피크 전류인가 시간은 1.4msec, 펄스 주기는 303Hz로 하여 용접을 실시하였는데 본 실험은 각 용접 변수가 용접성에 대해 어떤 영향을 미치는지 알아보기 위해 넓은 범위로 행하였기 때문에 설정



(a) 256Hz



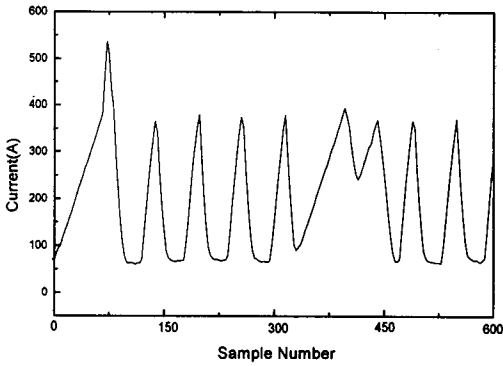
(b) 333Hz



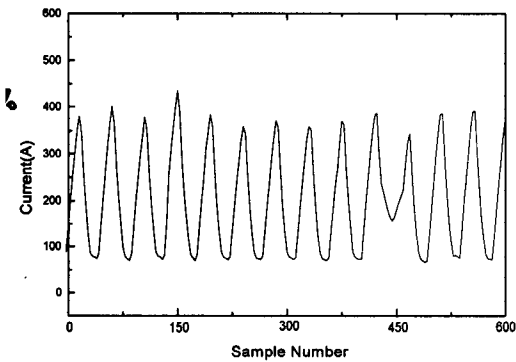
(c) 500Hz

Fig. 14 The relationship of welding current-voltage for pulse frequency.

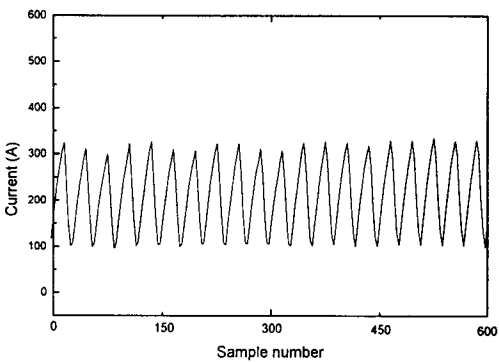
한 적정 조건은 용접부의 외관 상태와 용착 상태가 양호한 범위 안에서 최적의 조건을 기준으로 하여 설정하였다. Fig. 17은 평균 전류를 변화시킴에 따



(a) 256Hz



(b) 333Hz



(c) 500Hz

Fig. 15 Current wave form of pulse frequency.

라 스패터 발생량을 DCRP GMAW와 펄스 GMAW 법을 비교하여 나타내었다. 적정 조건에서

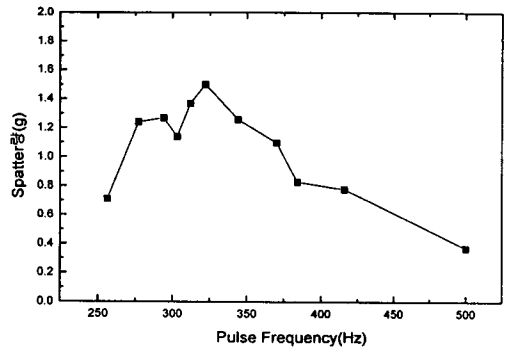


Fig. 16 Spatter generation of pulse frequency.

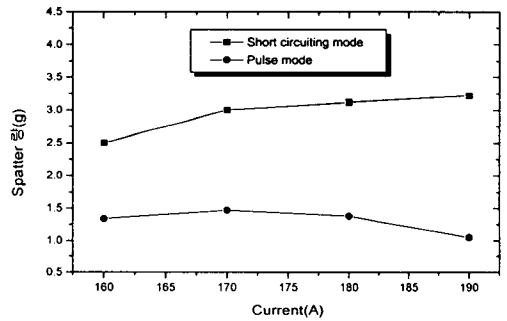


Fig. 17 Spatter generation of DCRP mode and PC GMAW.

펄스를 인가한 경우가 기존의 DCRP법에 비하여 1/3~1/4정도로 스패터 발생량을 감소시키는 것을 볼 수 있다.

4. 결 론

이와같은 실험 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. CO₂용접에서 단락이 파단에 의한 아크의 재점화와 아크의 압력에 의해 용융지로부터 용융된 금속이 비산되는 과정을 통하여 미세한 스패터가 형성되며, 반발 이행과 rotating 이행에 의하여 과립의 스패터가 주로 형성된다.

2. 용접 전류에 펄스를 인가하게 되면, 용적 이행 거동을 단락 이행 거동에서 자유 이행 거동으로 변화시키는 것이 가능한데, 펄스의 변수인 피크 전류, 기지 전류, 피크 인가시간, 펄스 주기등이 영향을 미친다.

3. 펄스 전류, 펄스인가 시간, 펄스 주기가 증가함에 따라서 미세한 스파터의 발생량은 감소하는 것으로 관찰되었다. 그러나, 이들 변수 값이 증가함에 따라서 반발 이행 거동은 증가하여 과립의 스파터가 형성되는 것이 관찰되었다.

4. 용접 전류에 가하는 펄스 변수들을 적절하게 조합하면, 파형 제어된 CO₂전용 용접기를 사용하지 않아도 스파터 발생을 제어할 수 있다.

후 기

본 연구는 공업기반기술 사업비로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J. F. Lancaster, The physics of welding, 2nd Ed., (1985), Pergamon press
2. Sehun Rhee, Elijah Kannatey-Asibu, Jr Observation of Metal Transfer during Gas Metal Arc Welding Welding Journal, Vol. 51 (1991), pp.203-213
3. V. A. Vukarov, S.S. Ermakov, Dynamics of energy characteristics of the arc in consumable electrode short-circuiting welding Welding International, Vol.7 (1993), pp.129-133
4. J. C. Amson, Britsh, Lorentz force in the molten tip of an arc electrode Brit. J. appl. Phys. Vol. 16 (1962), pp.232-249
5. T.Mita, Reducing spatter in CO₂ gas-sheilded arc welding- Waveform control Welding International, Vol. 3 (1989), pp.227-232
6. W. Shimada, J. Ukai, Effect of pulsed current control on welding quality improvement IIW, Doc. 22-B-11-81 (1981), pp.1-24
7. G. S. Murty, Instability of a conducting fluid cylinder due to axial current Ark. F. fys. Vol. 18, (1960) pp.241-250
8. G. S. Murty, Instability of a conducting fluid cylinder in the presence of an axial current, a longitudinal magnetic field, and a coaxial conducting cylinder Ark. F. fys. Vol. 19 (1961). pp.48.