

단락순간의 전류제어에 의한 CO₂ 인버터 아크 용접기의 스패터 저감

고재석, 채영민, 이승요, 목형수, 최규하,

건국대학교 전기공학과

The reduction of spatter in CO₂ inverter Arc Weling machine by the current control at the moment of short

J.S Gho, Y.M Chae, S.Y Lee, H.S Mok, G.H Choe

Dept of Electrical Eng. of Konkuk Univesity

Abstract

The conventional CO₂ inverter arc machine has constant voltage output characteristic and uses constant wire speed controller for welding current control. By adoption of PWM inverter to the welding machine, the spattering was reduced rather than the thyristor arc welding machine or AC arc welding machine. Moreover, by the high switching frequency, the output reactor size could be reduced evidently. Recently, the studies on optimal voltage and current waveform for the welding performance improvement have been studied. In this paper, a new instantaneous output current control scheme during the short circuit mode was proposed and showed the capability of arc stability improvement and the reduction of spatter generation.

1. 서론

솔리드 와이어 전극을 사용하는 용접기는 텅에서 전극과 모재가 함께 용융 되어 모재를 접합하는 방식이다. 비소모성 전극과 달리 솔리드 와이어가 송급 장치에 의해 용접단으로 연속적으로 이동해서 아크 열에 의해 모재와 함께 용융되어 용접을 하게 된다. 용융된 금속은 고온에 의해 산소와의 화학적 반응으로 산화하는 현상을 나타낸다. 이러한 화학적 반응으로 인해 용융금속 내부에 기포가 생기고 용접 품질을 저하시키므로 불활성 기체인 차폐가스를 사용하여 용접시 산화를 방지한다. 이러한 차폐가스의 종류에 따라서 MIG, MAG, CO₂ 용접 등으로 구분할 수

있으며 용접의 종류 중에 CO₂용접은 이산화탄소 가스가 저렴하여 경제적 장점을 가지고 있으므로 산업 현장에서 많이 쓰이고 있다. 그러나 용접의 품질 면에서 다른 차폐가스 방식에 비해서 용접품질이 나쁘고 스패터 발생이 많다는 문제점을 갖고 있으며 특히 용접과정에서 아크 반발력 및 전자기력에 의해서 발생하는 스패터는 용접작업의 생산성을 저하시키므로 스패터 발생을 최소화시키는 방법에 대한 연구가 국내외에서 진행되고 있다.[1-6]

CO₂ 아크 용접기의 용융금속 이행과정은 전자기력과 용융금속의 중력, 자기불림, 표면장력 및 Pinch력 등의 영향에 따라서 저전류 영역에서는 단락이행(short circuit transfer)이 발생하고 대전류 영역에서는 입상이행(globular transfer)이 발생한다.[8] 이 중 저전류 영역에서 발생하는 단락이행은 아크열에 의해 용융된 용적이 용적과 전극봉 사이에 벅을 형성하고 이것이 파단되는 과정을 반복하는 용적이행과정으로써 특히 아크 발생시와 단락 발생시에 다량의 스패터가 발생하는 것으로 알려져 있다.[1,2]

따라서 본 논문에서는 인버터 제어형 CO₂ 아크 용접기의 단락이행과정에서 발생하는 스패터를 최소화하기 위하여 용접기 출력전류를 단락이행순간 전류를 저전류로 유지함으로써 스패터 저감을 도모할 수 있는 제어방식에 관하여 연구하였다.

2. CO₂ 인버터 아크 용접기

가. 용접기의 구조

CO₂ 인버터 아크 용접기의 회로 구조는 그림1과 같이 교류측에 전파정류기와 인버터, 고주파 변압기 및 고속 다이오드를 사용한 DC측 전파정류기 그리고 출력단 리액터, 송급장치 등으로 구성되어 있다.

인버터 아크 용접기의 회로 토폴로지는 그림에서 볼수 있는 바와 같이 AC/DC-DC/AC-AC/DC의 전력변환회로를 갖고 있다.

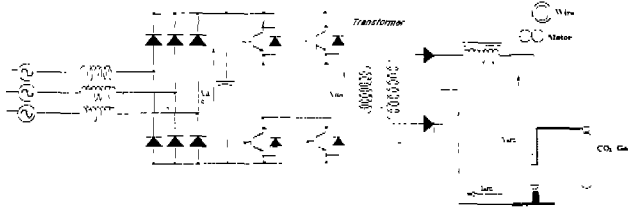


그림1. CO2 인버터 아크 용접기의 회로 구조

나. 금속이행

소모성 전극이 아크열에 의하여 용융되어 모재로 이행하는 것을 금속이행이라고 하며 용접 조건에 따라서 단락이행 입상이행 천이이행등으로 구분된다. 단락이행은 저전류에서 발생하는 현상으로 아크열에 의해 용융된 금속이 모재와 접촉하여 넥을 형성하고 전자기력에 의해서 이것이 과단되고 아크가 재생되는 것의 반복되는 현상을 말한다. 입상이행은 앞서 언급한 단락이 형성되지 않고 용융된 금속이 중력에 의해 연속적으로 모재로 이송되는 현상을 말한다. 천이이행은 중전류 영역에서 단락이행과 입상이행이 혼재되어 있는 상태이다. 천이이행 영역에서는 2[msec]이하의 순간단락과 스파터가 가장 많이 발생하고 또한 순간단락의 횟수와 스파터의 발생량이 비례한다고 알려져 있다.[6-8]

다. 용접기의 일반적 제어방식

일반적인 제어방식은 특정한 용접조건에서 인버터는 전압을 일정전압으로 출력하고 텃에서의 전압 및 전류는 금속이행상태에 따라서 변화하게 된다. 따라서 이행상태가 단락이면 전압은 단락전압으로 낮아지게 되고 전류는 단락순간부터 상승하게 된다. 전류가 충분히 증가하여 전자기력에 의해 브릿지가 과단 되면서 다시 아크가 재발생 되며 이와 같은 동작이 반복된다. 그림 2에 일반적인 제어 방식의 파형을 보여주고 있다.

용접기의 출력전압 지령치는 패널쪽 용접 전압 다이얼과 용접 전류 다이얼의 조합으로 얻어진다. 즉 전압 다이얼의 값 뿐 만이 아니라 전류 다이얼의 값을 같이 사용하여 용접전류가 높을수록 용접 전압 지령치도 비례해서 높게 만들어진다. 이 관계를 식(1)을 사용하여 나타내었다.

$$V^* = K_1 \cdot V_{dial} + K_2 \cdot I_{dial} \quad (1)$$

여기서, $K_1(\geq 0)$, $K_2(\geq 0)$ 는 비례상수

최근의 과형제어가 가능한 용접기는 단락 영역에서 전류의 상승 기울기를 제어하기 위하여 용접전류를 전향하여(feed-forward) 제어하는 방법을 쓰기도 하는데 식(2)와 같이 제어규칙을 표현한다.

$$V^* = K_1 \cdot V_{dial} + K_2 \cdot I_{dial} + K_3 \cdot I_{wel} \quad (2)$$

여기서 $K_1(\geq 0)$, $K_2(\geq 0)$, $K_3(\leq 0)$ 는비례상수

또한 전류다이얼의 값은 와이어의 송급장치의 송급속도를 제어하는데도 사용된다. 송급속도는 이론적 해석에 의하면 식(3)과 같이 2차함수로 표현되며 용접전류에 따라서 송급속도(v)는 비선형적인 함수 관계를 갖는다.[9]

$$v = C_1 \cdot I + C_2 \cdot I^2 \quad (3)$$

(C_1, C_2 : 상수)

식(1)또는 (2)와 (3)의 제어규칙에 의한 일반적인 기존방식의 용접전압 및 전류의 파형이 그림 2에 도시되었다. 그림에서 볼 수 있듯이 단락이 발생하는 순간 전류는 급격히 상승하기 시작하고 단락 브릿지가 과단되는 순간 아크가 재생되는데 이러한 순간에 스파터가 많이 발생되고 특히 단락이 발생하는 순간에 스파터 발생량이 가장 많다고 알려져 있다.

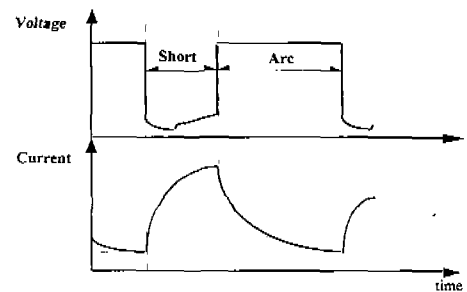


그림 2. 기존방식의 제어 개념도

3. 제안된 단락순간 전류제어 방법

본 논문에서는 앞서 기술한 일반적인 용접기 제어방식의 단락 발생 순간 스파터 발생률이 높다는 문제점을 극복하기 위하여 단락순간 일정시간 (T_d)동안 전류제어에 의하여 저전류(I_{base})로 유지하였다.

지연시간이후 모재와 붙어있는 단락기둥을 과단하고 새로운 아크재생을 발생시키기 위해서는 기

존의 제어에서 사용되는 방식의 정전압 제어방식으로 제어를 전환하였다.

그림 3에서 제안된 제어 개념을 보여주고 있으며 구간(I)은 단락구간중의 전류제어구간을 나타내며 구간(II)는 식(1)의 전압 지령치에 따른 정전압원으로 제어하는 것을 보여준다.

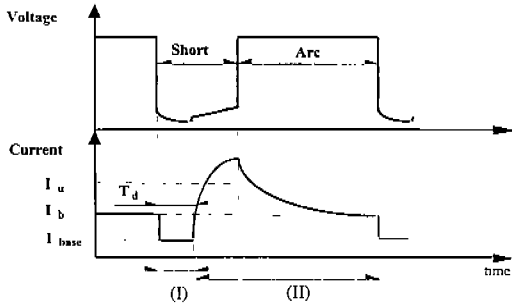


그림 3. 제안된 방식의 단락순간 전류제어 개념

그림 4는 연구된 단락 지연 전류제어기의 제어부 블록선도로써 그림에서 알 수 있듯이 제어부는 용접전압의 상태에 따라 출력모드를 선택한다. 즉 단락이 발생하게 되면 즉시 전류제어모드로 전환하고, 지연시간이 경과후 식(1)의 제어규칙을 갖는 정전압제어 방식으로 제어를 전환한다.

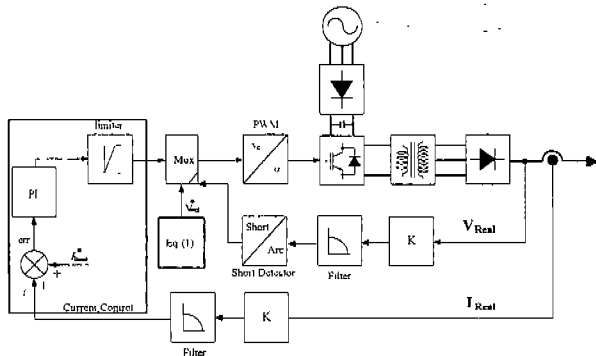


그림 4. 제어 블록 다이어그램

4. 실험 및 검토

제안된 단락지연시간 제어방식의 파형제어기법에 의한 용접특성분석을 위하여 제안된 파형제어기법의 실험결과를 기존의 정전압 제어방식에 의한 인버터 아크 용접기와 실험을 통하여 비교, 분석하였다.

아래 표1은 실험에 사용된 출력전압 및 전류의 조건으로써 제안된 단락순간 전류제어에 의한 전류 상승지연 기법에 대한 조건도 기존의 인버터 아크 용접기와 동일한 조건으로 설정하여 실험을 수행하였다. 특히 제안된 제어기법의 경우 단락지연시

간의 크기인 T_d 와 단락지연시간동안의 출력전류의 크기 I_b 에 따라 용접성능지표인 스패터 발생량이 변동되므로, 표 1에 나타난 제안된 파형제어기법의 조건은 실험에 의해 스패터 발생의 측면에서 최적인 조건으로 설정하였다.

표 1. 인버터 용접기 실험조건

출력전압 및 전류		제안된 파형제어기법의 제어파라미터	
Output Current	Output Voltage	지연시간 T_d	Base전류 I_b
150 [A]	19 [V]	2.0 [msec]	50 [A]
200 [A]	22 [V]	1.0 [msec]	70 [A]
250 [A]	27 [V]	2.0 [msec]	90 [A]
Shielding Gas : CO ₂			
Distance Between Electrode and Base Metal : 2.0 [cm]			
Used Base Metal : Steel (Thickness : 8[mm])			

그림 5는 출력전류가 200[A]인 경우의 실험 파형으로써 제안된 방식의 전류제어가 되고 있음을 볼 수 있다. 전류가 제어 지령치를 따라서 급격히 낮아지지 않는 이유는 리액터의 인덕턴스 때문이다. 단락지연시간인 T_d 와 단락 지연시 출력전류 I_b 를 70[A]와 1[msec]로 설정한 실험 파형으로써 용접조건이 알맞게 이루어짐에 따라 용접기 출력전류의 피크치가 일정하고 출력전류의 증가에 따라서 단락주기가 증가하지만 규칙적인 단락주기를 유지함을 알 수 있었다. 특히 200A의 경우 순간단락현상이 전혀 발생하지 않음을 알 수 있었다.

출력전류 150[A], 250[A]의 경우도 200[A]의 경우와 마찬가지로 출력 전압 및 전류 파형 측면에서 순간단락이 줄고 규칙적인 단락이행을 보여주었다.

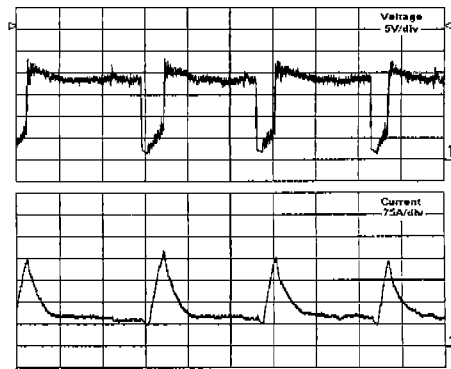


그림 5. 제안된 단락지연시간 제어방식 출력전압 및 전류 파형

(출력전류:200[A], 10[msec/div])

그림 6과 7은 단락시간의 히스토그램으로써 순간 단락현상의 발생빈도를 보여주고 있다. 용접전압

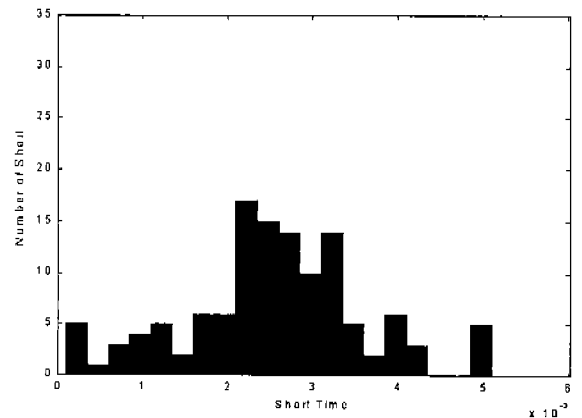
및 전류과형의 히스토그램에 의한 실험 결과 분석은 프로그램에 의한 데이터 처리 방법으로 행하였다.

그림 6은 기존의 인버터 아크 용접기의 경우 단락 시간에 따른 단락발생횟수의 나타낸다. 6(a)의 출력전류 150[A]에서는 2[msec]이상의 정상단락은 97회가 발생하였고, 2[msec]이하의 순간단락현상이 26회 발생하였다. 6(b)의 200[A]에서는 39회의 정상단락과 24회의 순간단락이 발생하였음을 보여준다. 6(c)의 250[A]의 출력전류에서는 31회의 정상단락과 24회의 순간단락이 발생하였고 이는 전류영역에서는 금속이행이 천이영역이므로 순간단락현상이 많이 증대되었음을 알 수 있다.

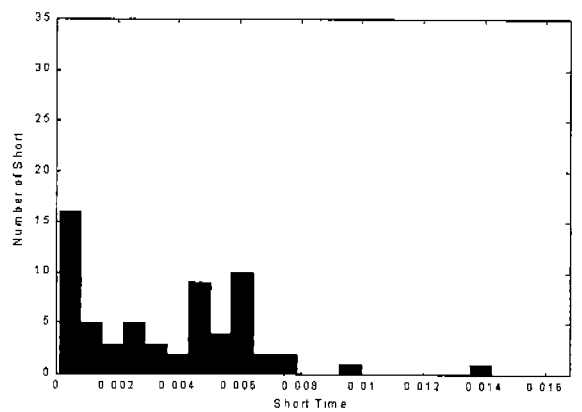
그림 7은 제안된 용접기의 경우 단락발생 히스토그램으로써 그림 7(a)의 출력전류 150[A]인 경우 대부분의 단락시간이 3~5[msec]동안 이루어지며 83회의 정상단락과 1번의 순간단락이 발생하였다. 이는 그림 6(a)과 비교시 순간단락현상이 거의 존재하지 않으며 단락지연시간에 따라 단락주기가 조금 증대하여 정상단락의 회수가 다소 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7(b)의 200[A]영역에서도 대부분의 단락시간이 4~6[msec]동안 이루어지며 59회의 정상단락과 13회의 순간단락이 발생한 결과를 알 수 있다. 특히 이 구간에서는 순간단락횟수의 감소와 더불어 정상단락횟수가 오히려 기존의 인버터 방식에 비해 증대되었음을 알 수 있다. 그림 7(c)의 250[A]의 출력전류인 경우 대부분의 단락시간이 4~7[msec]동안 이루어지며 26회의 정상단락과 12회의 순간단락이 발생하였고 이를 그림 6(c)와 비교시 정상단락횟수에는 큰 차이가 없으나 순간단락횟수가 감소되는 것을 확인할 수 있다.

이상의 단락횟수의 히스토그램에 따른 용접특성을 비교하면 제안된 단락지연시간 제어방식의 파형제어기법을 사용함에 따라 규칙적인 단락이행의 유지와 더불어 순간단락현상도 현저하게 감소됨을 확인할 수 있다.

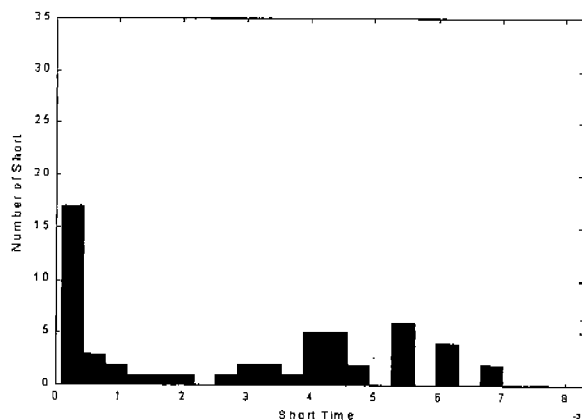
그림 8은 이상의 실험결과를 바탕으로 기존의 인버터 아크 용접기와 제안된 파형제어기법의 용접기에서 발생하는 스파터량을 비교한 파형으로써 발생된 스파터의 절대량을 비교한 것으로 전 전류영역에서 스파터 저감효과를 얻을 수 있었다.



(a) 출력전류 150 [A]인 경우

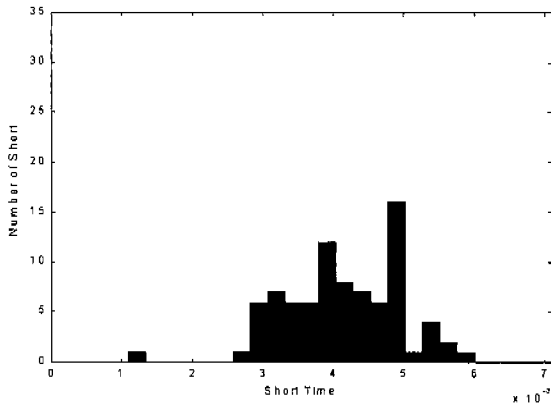


(b) 출력전류 200 [A]인 경우

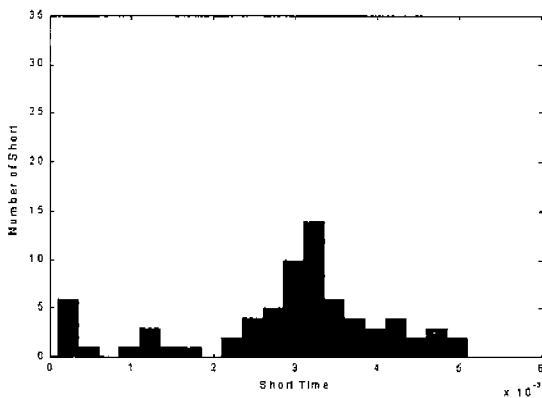


(c) 출력전류 250 [A]인 경우

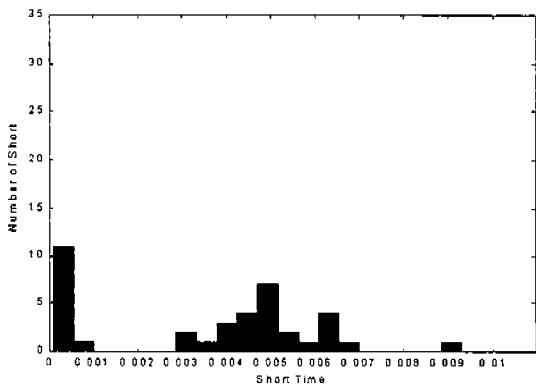
그림 6. 기존의 인버터 아크 용접기 단락시간 히스토그램



(a) 출력전류 150 [A]인 경우



(b) 출력전류 200 [A]인 경우



(c) 출력전류 250 [A]인 경우

그림 7. 제안된 인버터 아크 용접기 단락시간 히스토그램

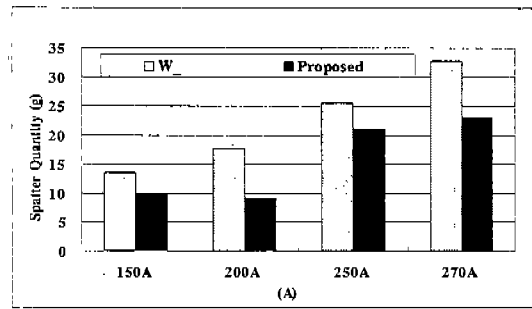


그림 8. 기존의 용접기와 제안된 용접기의 스패터 발생량 비교

5. 결론

본 논문에서는 CO₂ 인버터 아크용접기의 스패터 저감을 위해 단락이 발생하는 순간에 전류제어를 통해 전류로 유지하고 지연시간이 경과한 후 정전압으로 유지하는 제어기법을 제안하고 실험을 통하여 성능을 검증하였다.

실험에 의해서 저전류에서 대전류 영역까지 넓은 용접 조건에서 안정된 용접을 할 수 있었으며, 스패터의 취득을 통해서 그 발생량 또한 크게 줄일 수 있음을 확인하였다.

향후의 연구 과제로서는 본 연구를 통해 얻게 된 결과를 바탕으로 해서 다양한 용접조건에 대한 실험을 통하여 용접성능에 보다 지배적인 제어 요소를 찾아내는 것이다.

본 연구는 LG연암문화재단의 연구지원을 받아 이루어졌습니다.

참고 문헌

- [1] H. Yamamoto, "Recent advances in welding power systems for automated welding", *Journal of Japan Weld. Soc.*, Vol.64, No.6, p. 457, 1995.
- [2] H. Yamamoto, "Recent advances in inverter controlled arc welding power sources and their application", *Journal of Japan Weld. Soc.*, Vol.58, No.4, p. 273, 1989.
- [3] H. Yamamoto, et.al, "The Development of Welding Current Control Systems for spatter reduction", *Welding International*, Vol.4, No.5, p. 398, 1990

- [4] T.Mita, "Reduction Spatter in CO₂ Gas-Shielded Arc Welding Waveform Control", *Welding International*, Vol.3, p. 227, 1989.
- [5] E. K. Stava, "Low spatter welding", *Australasian Welding Journal*, 4th Quarter, p. 21, 1995.
- [6] S. Liu and T. A. Siewert, "Metal transfer in gas metal arc welding : Droplet rate", *Welding Journal*, Vol.68, No.2, p. 52, 1989.
- [7] J. A. Johnson, et. al, "Process control of GMAW : Sensing of metal transfer mode", *Welding Journal*, Vol.70, No.5, p. 91, 1991.
- [8] 김희진, "GMA 용접진원의 파형 제어기법 분석", *대한용접학회학회지*, Vol. 16, No. 5, p.29, 1998
- [9] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, 1984.