

단락지연제어 및 아크재생검출제어에 의한 CO₂ 인버터 아크 용접기의 용접성능향상에 관한 연구

高再錫*, 金信男, 蔡榮敏, 李承約, 李明彦, 崔圭夏

A Study on Welding Performance Improvement of CO₂ Inverter Arc Welding Machine by Short Circuiting Delay Control and Arc Reignition Detection Control

Jae-Seok Gho, Kil-Nam Kim, Young-Min Chae, Seung-Yo Lee, Myung-Un Lee, and Gyu-Ha Choe

요약

CO₂ GMAW의 연구동향은 주로 용접시에 발생하는 스패터의 저감에 초점이 맞추어져 있으며 이들은 크게 용접 재료의 개선 또는 용접전원의 개선으로 크게 분류될 수 있다. 용접재료 측면에서는 새로운 전극의 재질이나 차폐 가스 등 새로운 물질에 대한 연구 분야가 있으며 용접전원 측면에서는 아크상태를 최적으로 제어할 수 있는 회로구조 및 제어기법에 대한 연구이다. 본 논문에서는 PWM 인버터형 CO₂ GMAW의 금속이행과 및 용접을 위한 여러 제어기법에 대하여 기술하였다. 또한 단락이행시 및 아크재발생시의 제어에 의한 스패터의 저감 방법을 제시하였으며 여러 제어방식과 스패터 저감특성을 비교 연구하였다.

ABSTRACT

The recent research topics on CO₂ arc welding power supplies are focused mainly on the reduction of spatter generation. The method for reducing the spatters can be approached in several ways: finding the new materials for consumable electrode and shielding gases, researching on the circuit topology and the controller. In this paper, the metal transfer and several control methods for the CO₂ GMAW were described. And it was proposed and compared with other schemes that the control method for reducing spatter by controlling the welding current when short-circuit and re-ignition.

Key Words : GMAW, Arc welding, Short circuiting, Arc Reignition, PWM

1. 서론

전기아크용접은 저전압 전기방전현상을 이용하여 전기에너지를 고온의 아크 열로 변환하여 모재를 용융,

접합하는 기술이다^[1]. 전기아크용접은 차폐가스나 사용 전극에 따라 여러 가지로 분류되며, 이중에 CO₂ GMAW(CO₂ Gas Metal Arc Welding)는 소모성 전극과 이산화탄소를 차폐가스로 사용하며 국내에서 가장 많이 이용되는 용접기법중 하나이다. 이것은 차폐가스의 가격이 저렴하고 용접속도가 빠르다는 장점을 가지고 있으나 용접품질 면에서 비드와 용입상태가 다소 나쁘고 스패터가 다량으로 발생하는 단점을 가지고 있다^[2].

스패터란 용접중 모재로 이동하지 않고 공기 중으로

*건국대학교 전력전자기술연구소 연구원

E-mail : ghojs@kkucc.konkuk.ac.kr

접수일자 : 2002. 4.11

1차심사요청일 : 2002. 4.16

심사완료일 : 2002. 5.24

비산되는 용융금속의 입자로서 아크가 재발생하는 순간 및 순간단락(ISC: Instantaneous Short Circuiting) 시 가장 많이 발생된다고 알려져 있다^[3,4]. 따라서, 과형제어기법에 의해 출력전류 및 전압의 과형을 다양한 방법으로 제어하여 스파터를 줄이려는 연구들이 진행되어 왔다. 그 중 순시전류제어에 의한 과형제어기법은 펄스전류 제어방식과 전류기울기 제어기능을 갖는 방식 등이 제안되었으나 순간단락 및 아크 재발생시의 제어가 없으므로 스파터 저감에 주는 영향이 작았다^[5,6,7,8]. 따라서 단락순간에 전류 상승을 지연시키는 방법이 연구되었으며, 이는 순간단락을 억제하는 효과가 있어서 스파터량을 일정량 감소시킬 수 있었다. 그러나 단락전류 지연방식도 아크 재발생시의 스파터 제어 기능이 없으므로 스파터 저감에 한계가 있었다^[9].

본 논문에서는 CO₂ 인버터 아크 용접기의 아크 안정화 및 스파터 저감을 위하여 단락전류 지연제어 및 아크 재발생시의 전류제어에 관하여 연구하였으며 실험을 통하여 그 특성을 비교하였다.

2. CO₂ 인버터 아크 용접기 시스템

2.1 아크 용접기

전력용 트랜지스터나 IGBT등의 스위칭 소자의 발전과 더불어 아크용접기는 그림 1(a)와 같이 전원의 수하특성을 이용하여 용접하는 구조에서 그림 1(b), (c)와 같이 출력단 전압과 전류의 제어가 가능한 구조로 발전해왔다. 그림 1(a)는 교류아크용접기로서 누설변압기를 적용하여 전원이 수하특성을 갖도록 한다. 수하특성에 의해서 용접전압 및 전류를 안정화시키는 방식으로서 가장 원시적인 형태의 아크용접기이다. 그림 1(b)는 출력단 전압 또는 전류의 제어가 가능한 SCR 제어형 전기 용접기이다. SCR의 ON-OFF동작에 의해서 출력단 전압 및 전류를 제어하는데 낮은 스위칭 주파수 때문에 큰 출력단 리액터를 필요로 한다. 반면에 그림 1(c)는 전력용 TR 또는 IGBT를 채용한 인버터 제어형 용접기의 구조로서 전파정류기와 인버터, 고주파 변압기, 전파정류기 그리고 출력단 리액터 및 송급장치 등으로 구성되어 있다. 이 방식은 10-20[kHz]의 고속 스위칭으로 동작하므로 SCR 제어형 인버터 용접기보다 작은 출력단 리액터로도 전압-전류의 제어가 가능하다.

2.2 아크용접의 금속이행과 스파터의 발생

용접에서 제어의 가장 중요한 목적은 출력 전압 및

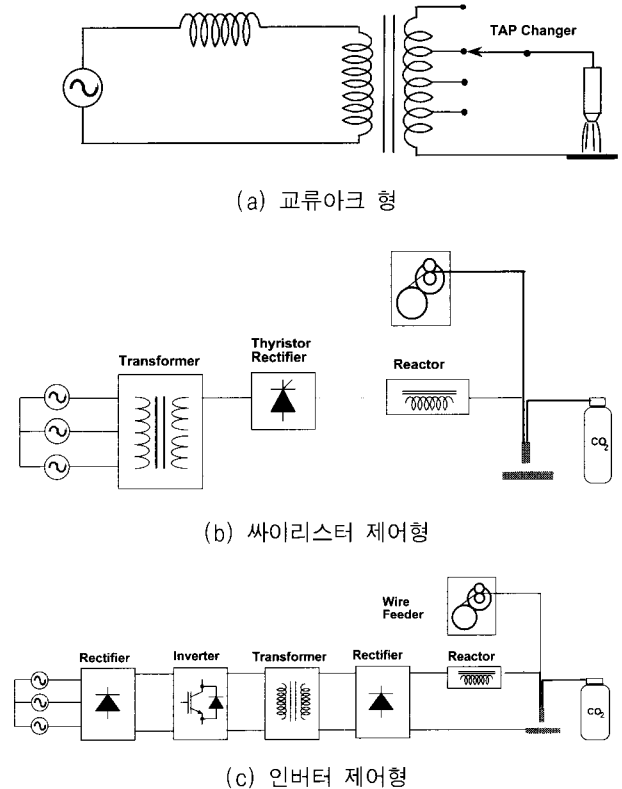


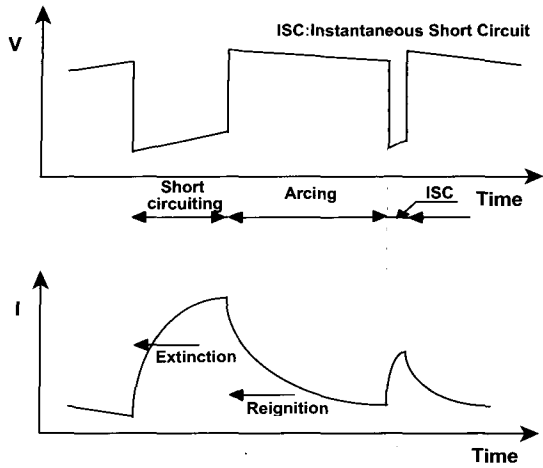
그림 1 아크 용접전원의 종류

Fig. 1 Classification of welding power sources

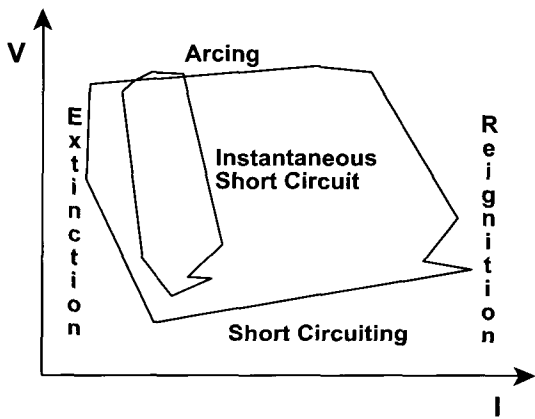
전류를 적절히 제어함으로써 스파터 발생을 최소화시키며 동시에 양호한 용접비드가 형성되도록 하는 것이다. 이를 위해서는 용접시의 전류 및 전압 과형과 금속이행(metal transfer)의 이해가 필요하다.

금속이행이란 용접전류의 크기에 따라 용적(welding drop)이 용융지(welding pool)로 이행되는 양상을 말한다. 금속이행은 단락이행(short circuited metal transfer)과 입상이행(globular metal transfer) 그리고 천이이행으로 구분을 할 수 있다. 단락이행은 저전압·저전류의 용접조건에서 발생하는 금속이행으로서 단락상태와 아크상태가 교대로 나타나며 용접이 수행된다. 입상이행은 GMAW에서 대전류 용접시 발생하는 금속이행 현상으로 송급되는 와이어의 직경보다 2~3배 크기 용적이 중력에 의해 와이어 선단에서 떨어져 초당 수 개 내외로 용융지로 이동하는 금속이행이다. 입상이행은 용융지와 접촉하지 않고 금속이행이 일어나며 단락구간이 없어서 평균전압이 높게 측정된다는 특징을 가지고 있다.

이러한 금속이행 과정 중에서 스파터가 다량으로 발



(a) 단락이행시 용접 전압·전류 파형



(b) 그림 (a)의 단락이행시 V-I 궤적

그림 2 단락이행시 용접 전압-전류 궤적
Fig. 2 Voltage and current waveform and V-I trajectory in short circuiting

생하는 원인은 불안정한 아크에 의한 순간단락(ISC : Instantaneous Short Circuiting)과 아크가 재발생하는 순간의 높은 전류치에 있다. 그러므로 스파터 발생을 억제하기 위해서는 단락순간과 아크 발생시의 높은 전류를 최대한 억제하는 것이 기본 개념이며 이를 바탕으로 다양한 연구가 이루어졌다^[4].

그림 2(a)의 용접 전압과 전류의 파형은 정상적인 단락과 순간단락을 나타내고 있다. 순간단락은 아크가 불안정할 때 발생한다. 정상적인 단락이행이라면 단락이 시작되어 전류가 충분히 증가된 후 다시 아크가 재발생되어야 하지만, 순간단락시에는 용융지와 접촉한 용적이 스파터가 되어 튀어나가면서 아주 짧은 시간 내에 다시 아크상태로 되는 것을 말한다. 그림 2(b)는

전압-전류의 궤적을 나타낸 것이다. 정상적인 단락이 발생할 경우 그림 2(b)의 바깥쪽 사각형의 궤적이 그려지지만 순간단락이 발생할 경우 전류가 최대값까지 상승하지 못하고 다시 떨어지는 특성에 의해서 궤적은 그림과 같이 안쪽에 궤적이 그려진다.

3. 아크 용접기의 제어

전술한 바와 같이 금속이행에 따른 스파터 및 용접 비드를 최적으로 제어하는 것이 아크 용접에서의 제어 목적이며, 이를 위해 다양한 제어기법들이 연구되었다. 본 절에서는 기본적인 제어원리 및 본 논문에서 제시한 제어기법을 기술하고자 한다.

3.1 전압제어

전압제어법은 용접기의 출력전압을 일정전압으로 출력하고 용접전류는 송급모터의 송급속도를 조절하여 제어하는 방식이다. 전압제어의 경우 출력단 전압 제어는 식 (1)에 의해서 출력전압의 평균치를 제어한다. 여기서, V_1^* 는 출력전압의 지령치이고 V_{ref}^* 는 용접전압 지령치이다. K_V 및 K_O 는 상수로서 전자는 용접전압 지령치에 대한 출력전압의 이득이고 후자는 용접 전류 및 변압기 수하특성에 의해서 결정되는 값이다.

$$V_1^* = K_V \cdot V_{ref}^* + K_O \tag{1}$$

이 제어기법에서 용접전류는 와이어의 송급속도에 의해 간접적으로 제어되기 때문에 직류 리액터가 충분히 크지 않으면 전류원 특성을 가질 수가 없어 아크가 불안정한 특징이 있다.

3.2 전압 및 전류제어법

IGBT나 전력용 TR등을 이용한 인버터 방식을 채용함으로써 순시전류제어에 의해서 작은 리액터를 설치하고도 전류제어에 의해서 안정된 아크상태를 유지할 수 있는 전류원의 특성을 낼 수 있다. 이를 위해 식 (1)의 전압제어와 더불어 순시적인 전류제어에 의한 강제적 수하특성을 부여하기 위해서 식 (2)의 전류제어를 부가한다. 전류제어기는 PI제어기나 P제어기로 구현이 되며, 전류지령치를 용접 전류가 추종하도록 인버터 출력전압이 결정된다. 식에서 K_P 와 K_I 는 각각 비례이득과 적분이득이고 I_{wel}^* 와 I_{wel}^* 는 각각 용접전류와 용접전류의 지령치이다.

$$V_2^* = K_P(I_{wel}^* - I_{wel}) + K_I \int (I_{wel}^* - I_{wel}) dt \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)의 제어방식을 혼합에 의하여 식 (3)과 같이 인버터 출력 전압을 생성할 수 있다. 여기서 K_1 , K_2 는 비례상수이고 전압제어기와 전류제어기의 반영비율을 나타낸다. 예를 들어 $K_1 \gg K_2$ 일 경우 전압원의 특성이 나타나고, $K_1 \ll K_2$ 일 경우 전류원의 특성이 강하게 나타난다.

$$V^* = K_1 V_1^* + K_2 V_2^* \quad (3)$$

K_1 과 K_2 의 비는 식 (1), (2)의 상수들과 마찬가지로 이론적으로 분석하기가 어려우므로 실험에 의해 얻어지는데 약 8:2의 비가 안정된 아크 특성을 보인다.

전압 및 전류제어법은 전술한 순간단락 및 아크재생시 제어가 없으므로 스파터 저감효과가 크지 않다. 그러나 제어기에 의해 전류원 특성을 구현함으로써 직류 단 리액터의 크기를 줄이고 아크의 안정도를 향상시키는 결과를 가져왔다.

3.3 단락지연제어(SCDC)^[9]

단락지연제어(SCDC: Short Circuiting Delay Control)은 순간단락(ISC)에 의한 스파터 저감하기 위하여, 단락순간 일정시간(T_d)동안 전류제어에 의하여 저전류(I_{base})로 유지하고 지연시간 이후에는 전압 및 전류제어(3.2절)로 전환하게 된다. 그림 3에 단락지연 제어기법의 전압 및 전류 파형을 나타내었다.

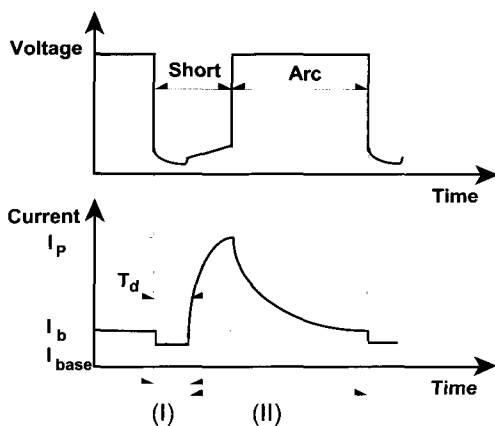


그림 3 단락지연제어(SCDC)의 전압 및 전류파형
Fig. 3 Output voltage and current waveform by short circuiting delay current control

구간 (I)은 전류제어구간을 나타내며 구간 (II)는 전압 및 전류 제어하는 구간을 나타낸다. 이 방법은 순간단락을 정상단락으로 유도하고 단락순간에 발생하는 스파터를 저감하는 할 수 있으나 아크 재발생시에 발생하는 스파터를 제어하지 못한다.

3.4 제안한 파형제어법(SCDC+ARDC)

단락지연 제어는 순간단락을 억제하여 스파터 저감 효과를 얻을 수 있었지만, 아크재생시에는 전류가 최대로 상승된 상태에서 강한 아크분출(arc jet)과 함께 아크가 재발생되므로 스파터 발생을 충분히 저감할 수 없었다. 따라서, 아크가 재발생되기 직전의 전류를 일정시간(T_a) 동안 낮게 유지하여 저전류 상태에서 아크가 재발생되도록 제어하는 아크재생검출제어(ARDC: Arc Reignition Detecting Control)가 필요하다.

본 연구에서는 SCDC와 ARDC를 동시에 제어하여 용접시 발생하는 스파터의 양을 최소화 하고자 한다. 그림 4에 제안된 SCDC+ARDC의 동작을 나타내는 전압-전류 파형을 나타내었다.

아크의 재발생 검출을 설명하기 위해서 그림 5에 용접시의 전압 및 전류 파형을 나타내었다. 그림에서 단락이 발생된 후에 전압이 일정한 기울기를 가지고 증가하다가 전압이 일정시점에 이르러야 아크가 재발생되는 것을 관찰 할 수 있다. 따라서 아크가 재발생되는 시점의 전압보다 약 1[V]정도 낮은 전압을 기준으로 하여 아크재생시의 제어가 가능하다. 또한 아크의 재발생을 판단하는 기준전압은 용접전류에 따라서 달라지므로 제어기에서는 용접전류의 크기에 비례하는 전압 기준을 선택한다.

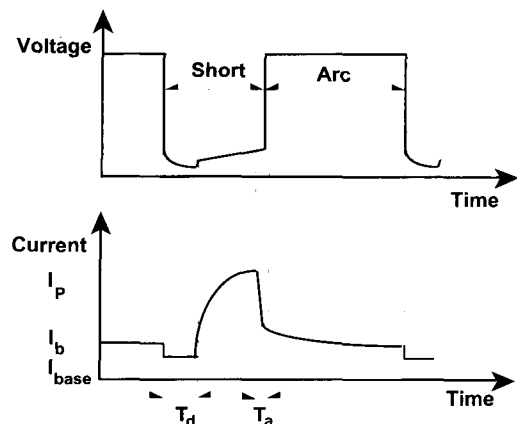


그림 4 제안된 SCDC 및 ARDC 기법
Fig. 4 Proposed SCDC and ARDC Method

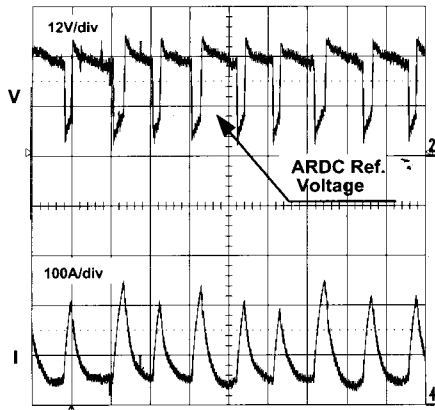


그림 5 아크 재생 검출을 위한 기준 전압
Fig. 5 Reference voltage for the detection of arc reignition

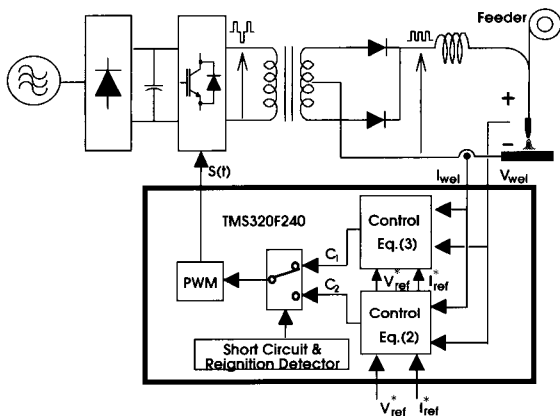


그림 6 제안된 SCDC 및 ARDC 제어블록선도
Fig. 6 Proposed control block diagram of short circuit delay and arc reignition control

제안한 단락지연 및 아크재생검출제어를 위한 제어 블록선도는 그림 6과 같다. 용접 전압 V_{wel} 에 의해서 단락 시점 및 아크재생 시점을 검출하고, 이에 의해서 T_d 및 T_a 구간에는 식 (2)에 의한 전류제어 모드로 전환하고, 나머지 구간에서는 식 (3)에 의한 전압 및 전류제어 모드를 유지한다.

그림 7은 시스템의 동작 타이밍도 이다. T_{sw} 는 토치스위치의 동작 상태를 나타내고, C_1 및 C_2 는 제어기의 선택신호를 나타낸다. 단락지연시간 동안과 아크재발생 직전시간에는 C_2 에 의해서 전류 제어가 제어되며, 나머지 시간동안은 C_1 에 의해서 출력 제어가 이루어진다. Gas 및 Feeder는 각각 가스공급 신호 및 와이어 송급 신호를 의미한다.

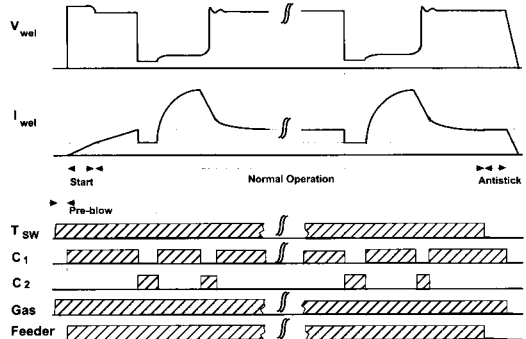


그림 7 전체 동작모드 타이밍도
Fig. 7 Timing chart of operation mode

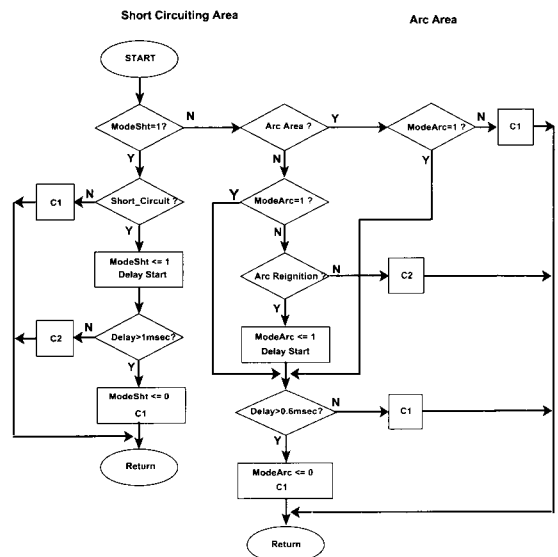
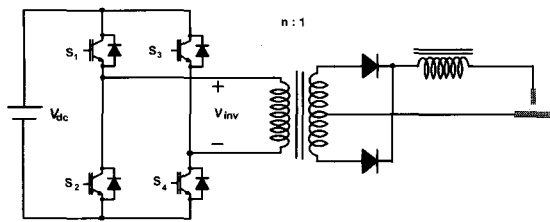


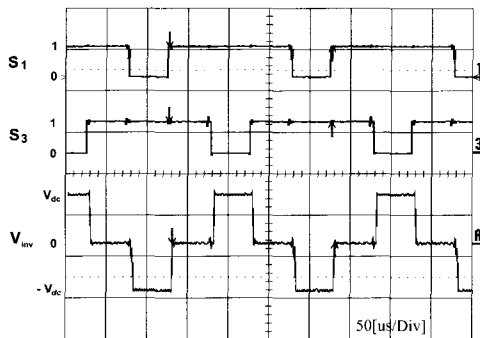
그림 8 SCDC + ARDC 제어 흐름도
Fig. 8 Flow chart of short circuit delay and previous arc reignition

그림 8는 그림 7의 동작모드에 따른 순차적 동작을 흐름도로 나타낸 것이다. 흐름도는 제어주기마다 한번씩 수행되지만 전체적으로는 시퀀스 동작을 내포하도록 되어있다. 흐름도에 나타낸 것과 같이 단락구간 및 아크구간에서의 동작으로 크게 구분할 수 있고, 단락순간 및 아크 재생 직전을 검출하여 지연시간 동안 전류제어에 의해서 전류를 제한한다.

본 연구에 적용된 전력부는 그림 9(a)의 DC-DC 변환회로의 구조를 갖는다. 출력전압지령치와 인버터의 직류단 전압의 비에 의해서 출력전압 듀티비(duty ratio)를 계산하고, 타이머에 의해서 그림 9(b)의 S_1 및 S_3 와 게이팅 신호를 생성한다.



(a) 회로 토폴로지



(b) 스위칭 인가신호와 인버터 출력

그림 9 스위칭상태 및 인버터 출력파형
Fig. 9 Switching state and inverter output waveform

S₂과 S₄는 각각 S₁ 및 S₃의 반전 신호이므로 인버터의 출력전압은 S₁ 및 S₃의 함수로 나타낼 수 있다. 따라서 인버터 출력전압은 $v_{inv} = (S_1 - S_3) \cdot V_{dc}$ 와 같이 교류가 되고, 풀브릿지 정류기를 통해서 최종적으로 다시 직류로 변화되어 출력된다.

4. 실험 및 검토

본 절에서는 제안된 SCDC+ARDC기법의 평가를 위해서 실험 결과에 대하여 검토한다. 제안된 기법의 제어 및 PWM발생은 디지털 제어방식을 적용하였으며, 컨트롤러는 TI의 TMS320F240을 이용하였다. 제어 신호 및 변수들은 각자의 정격으로 정규화 하여 고정소수점(fixed point) 연산에 의해서 구현하였다. 시스템의 정격은 표 1에 나타내었다.

실험은 전압 및 전류제어기법, SCDC, ARDC, SCDC+ARDC을 이용하여 각각의 용접성능을 비교, 평가하였다. 용접전류는 100[A], 200[A]의 조건에서 실시하였으며, 와이어의 공급 속도는 각각의 용접전류에 대해서 2.0[m/min]과 5.5[m/min]을 적용하였으며, 모재의 이송속도는 각각의 용접전류에 대해서 15[cm/min]과 30[cm/min]을 적용하였다. 사용된 와이어와 모재 그리

표 1 실험에 적용된 시스템 사양

Table 1 The system specification used for experiments

항 목	사 양
전원전압	3상 220[V]
전력용량	15[kVA]
최대출력전압(무부하시)	70[V]
최대출력전류(부하시)	350[A]
최대출력전압(부하시)	40[V]
스위칭주파수	10[kHz]

고 전극과 모재와의 거리도 모두 동일한 조건에서 실시하였다.

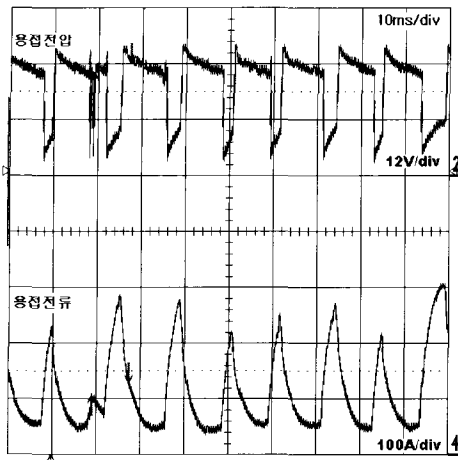
용접성능을 분석하기 위해서 용접전압, 용접전류 파형 및 전압-전류 궤적, 스퍼터 발생량을 분석하는 것이 일반적이다. 그림 10은 실시간 전압 및 전류의 파형이고, 그림 11는 전압-전류의 궤적으로서 인버터 아크용접기의 출력전압과 전류를 50,000개/초의 비율로 수집한 후, Matlab을 이용하여 나타낸 것이다. V-I 궤적은 그림 2와 같이 단락이행을 수행하는 동안 반시계 방향으로 회전하며 사각형의 궤적을 나타낸다. 특히, 사각형 내부에 존재하는 궤적들은 순간단락과 같이 불안정한 금속이행에서 나타난다.

전압 및 전류제어방식을 이용한 출력파형은 그림 10(a) 및 그림 11(a)에서 보는 바와 같이 출력전류의 피크 값이 균일하지 않고, 정상적인 단락이행시간보다 작은 즉 2[msec]이하의 순간단락이 발생한다.

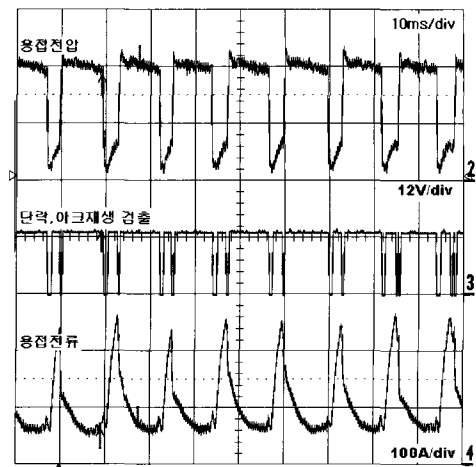
그림 10(b) 및 그림 11(b)는 SCDC제어방식을 이용한 출력파형으로 전압 및 전류제어방식과 비교하여 단락주기가 훨씬 일정하게 이루어지고 있으며, V-I궤적의 내부를 가로지르는 순간단락이 줄어든 것을 볼 수 있다. 반면에 아크재생시의 피크전류는 균일하지 않다.

그림 10(c) 및 그림 11(c)는 ARDC제어방식의 출력파형 및 궤적이다. 아크 재생전의 검출은 기준전압을 100[A] 용접시에는 5.5[V], 200[A] 용접시에는 6.5[V]로 선정하였다. 아크 재생전 검출을 통한 전류제어에 의해서 전류의 최대치가 균일해졌지만, 순간단락이 존재함을 볼 수 있다.

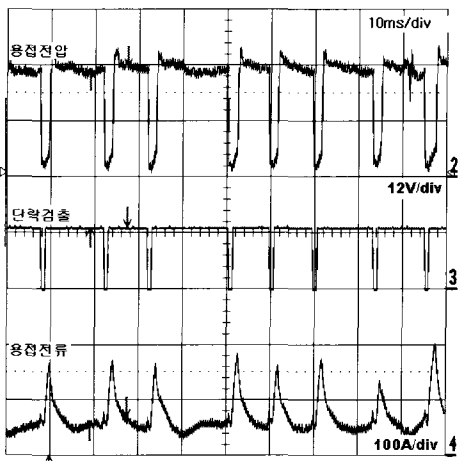
그림 10(d)와 그림 11(d)는 SCDC와 ARDC를 동시에 적용한 실험결과와 파형 및 V-I궤적이다. SCDC 제어시 전류제어 시간은 1[msec]로 설정하였고, ARDC 제어시 전류제어는 0.6[msec]로 실험하였다. 이 경우 ARDC에 의해 전류의 최대치가 균일하고, SCDC에 의해 순간단락이 발생하지 않는다.



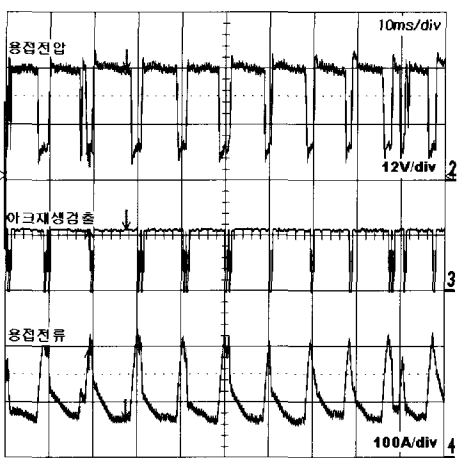
(a) 전압 및 전류제어기법



(d) 단락지연 및 아크 재생제어기법(SCDC+ARDC)

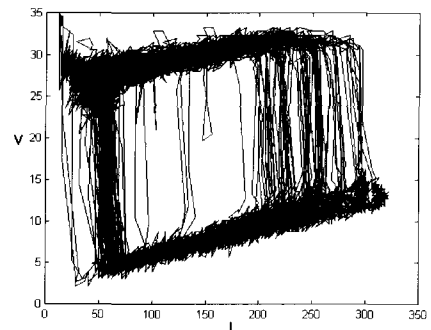


(b) 단락지연 제어기법(SCDC)

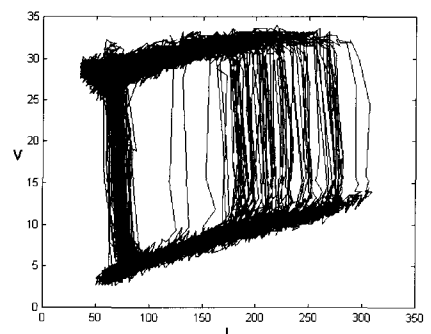


(c) 아크재생 검출제어기법(ARDC)

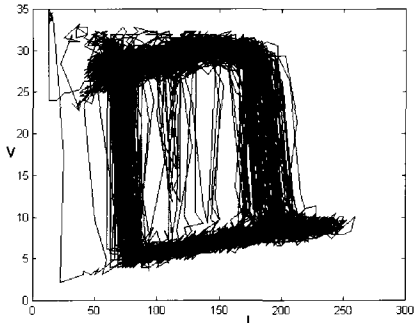
그림 10 다양한 파형제어기법별 파형
Fig. 10 The various waveform according to control methods



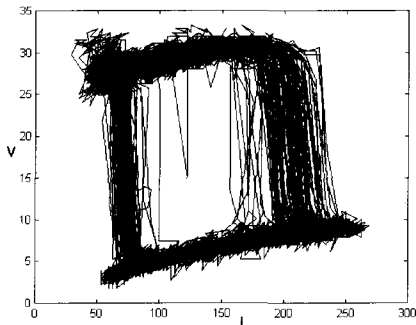
(a) 전압 및 전류제어기법 V-I 궤적



(b) 단락지연 제어기법(SCDC) V-I 궤적



(c) 아크재생 검출제어기법(ARDC) V-I 파형



(d) 단락지연 및 아크재생 검출제어기법의(SCDC+ARDC) V-I 궤적

그림 11 다양한 제어기법의 V-I 궤적

Fig. 11 The V-I trajectories according to various control methods

표 2 제어방식에 따른 스파터 발생량 비교

Table 2 Comparison of generated spatter between variable control methods

	100A 용접시 (와이어 : 10m, 총중량 85g)				200A 용접시 (와이어 : 20m, 총중량 170g)			
	모재 중량	용접 후	용접 량	스패터 발생량	모재 중량	용접 후	용접 량	스패터 발생량
전압 및 전류제어	6248g	6318g	70g	15g (17.6%)	6207g	6358g	151g	19g (11.2%)
SCDC	6192g	6263g	71g	14g (16.5%)	6204g	6357g	153g	17g (10%)
ARDC	6233g	6308g	75g	10g (11.2%)	6229g	6389g	160g	10g (5.8%)
SCDC + ARDC	6224g	6302g	78g	7g (8%)	6150g	6312g	162g	8g (4%)

표 2는 제어기법에 따른 스파터의 발생량을 나타내었다. 스파터 발생량을 측정하기 위해서 실험 전에 모재중량 및 사용될 와이어의 중량을 측정하고, 실험 후에 용접된 와이어 및 모재의 총 중량을 측정하였다. 스파터의 발생량은 실험전의 모재 및 와이어의 총중량에서 실험후의 총중량을 뺀 것으로 정확한 스파터량을 얻을 수 있었다. 표에서 나타난 것과 같이 SCDC 및 ARDC를 동시에 하는 것이 가장 효과적임을 알 수 있다. 또한, 단락순간의 제어보다 아크재생시의 제어가 스파터의 저감 효과가 큰 것을 볼 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 CO₂ 인버터 아크 용접기에서 가장 큰 문제점인 다량의 스파터 발생을 저감하는 방법으로 SCDC+ARDC 제어를 제안하였다. 전압 및 전류 제어, 단락지연 제어(SCDC), 아크재생 검출제어(ARDC) 그리고 단락지연 제어 및 아크재생 검출제어(SCDC+ARDC)의 4가지의 제어방식에 따라서 실험을 통해 비교하였다.

그 결과 SCDC에 의한 순간단락 억제와 및 ARDC에 의한 아크폭발력의 저감에 의해서 스파터 발생량이 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 특히 순간단락시 발생하는 스파터를 억제하는 것보다 아크재생시에 발생하는 것을 억제하는 것이 더 우수한 성능을 보임을 알 수 있었다. SCDC+ARDC제어의 경우 전압 및 전류제어방식에 비하여 100[A]시 45%, 200[A]시 36%의 스파터 저감효과를 가져왔다.

본 연구는 2001년도 건국대학교 학술진흥연구지원에 의해 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] J.F. Lancaster, "The Physics of Welding", Pergammon Press, 1984.
- [2] H. Yamamoto, "Recent Advances in Inverter Controlled Arc Welding Power Sources and Their Application", Journal of Japan Weld. Soc., vol. 58, no. 4, pp. 273, 1989.
- [3] H. Yamamoto, "The Development of Welding Current Control Systems for Spatter Reduction", Welding International, vol. 4, no. 5, pp. 398, 1990.
- [4] 김희진, 김용석, "CO₂ 용접의 스파터 저감을 위한 용접전

- 류 파형 제어 개념”, 대한용접학회 논문지, 제16권 제3호, pp. 18~27, 1998년 6월.
- [5] S. Liu and T.A. Siewert, "Metal Transfer in Gas Metal Arc Welding", *Welding Journal*, vol. 68, no. 2, pp. 52, 1989.
- [6] T. Mita, "Reduction Spatter in CO₂ Gas-Shielded Arc Welding Waveform Control", *Welding International*, vol. 3, pp. 227~232, 1989.
- [7] T. Maruyama, M. Sato, and Y. Hida, "Waveform Control in Gas Shielded Arc Welding", *Journal of the Japan Welding Society*, July 1988.
- [8] 채영민, 고재석, 김진욱, 이승요, 최해룡, 최규하, "인버터 아크 용접기의 파형제어기법 및 성능향상에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제4권 제2호, pp. 128~137, 1999년 4월.
- [9] 고재석, 채영민, 이승요, 목형수, 최규하, "단락순간의 전류제어에 의한 CO₂ 인버터 아크 용접기의 스패터 저감", 전력전자학회 학술대회논문집, pp. 585~590, 1999년 7월.

저 자 소 개



고재석(高再錫)

1967년 6월 3일생. 1994년 건국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2001년~현재 건국대 전력전자기술연구소 연구원.



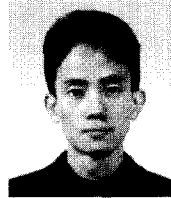
김길남(金佶男)

1972년 7월 28일생. 1996년 건국대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년~현재 삼성전자(주) 연구원.



채영민(蔡榮敏)

1967년 2월 24일생. 1993년 건국대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1999~현재 Delta Co. 연구원.



이승요(李承約)

1967년 7월 16일생. 1994년 건국대 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 2000년~2001년 건국대 전력전자기술연구소 연구원. 2001년~현재 미국 버지니아 공대 Post-Doc.



이명연(李明彦)

1960년 6월 11일생. 1983년 건국대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년~2001년 대양전기학원 원장. 현재 서울대 전력설비/자동화 전공 겸임교수.



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 1997년~1998년 건국대 연구처장. 현재 건국대 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구소 소장, 대한전기학회 기획이사.