

인버터 아크 용접기의 단락이행성능 개선을 위한 순시 출력전류제어에 관한 연구

論 文
48B-5-5

A Study on Instantaneous Output Current Control for Short-Circuit Mode Improvement of Inverter Arc Welding Machine

蔡榮敏*, 高再錫**, 具滋悅***, 睦亨洙§, 崔圭夏§, 金喜珍§§

(Yong-Min Chae, Jae-Seok Gho, Ja-Yeol Goo, Hyung-Soo Mok, Gyu-Ha Choe, Hee-Jin Kim)

Abstract - Recently the performance of CO₂ arc welding machine has been advanced significantly through the adoption of inverter circuit topology which made it possible to control the waveform of welding current and thus to suppress the spatter generation. However, the optimum waveform is still uncertain. As a first step for figuring out the promising waveforms, this study was performed to set-up the experimental system for studying the effect of waveform variables. The system designed in this study is a digital controller using single chip microprocessor of 80C196KC. As a result of performance test of this system, it was demonstrated all of the waveform variables could be set individually and the resultant waveforms appeared to be pretty much the same as the intended one.

Key Words : Inverter, digital control, CO₂ arc welding machine, spatter, bead states, instantaneous current control, short circuit, metal transfer.

1. 서 론

일반적으로 솔리드 와이어 전극을 사용하는 용접기는 용접 기법에서 송급되는 전극봉이 모재와 같이 용융되어 모재를 접합하는 방식으로서 아크 및 용융급속이 산소와 반응하여 산화되는 현상을 방지하기 위해 CO₂, 아르곤(Ar) 혹은 CO₂ + 아르곤(Ar) 등의 차폐가스를 사용하며 이러한 차폐가스의 종류에 따라서 MIG, MAG, CO₂ 용접으로 구분된다.[1]-[5]

본 논문의 연구대상인 CO₂ 아크 용접은 가스가격이 저렴하여 경제성이라는 장점 때문에 일반 산업현장에서 많이 사용되고 있으나 용접품질이 다른 여타 용접에 비하여 다소 떨어지고, 스파터가 다량으로 발생하는 단점이 있다.

특히 용접과정에서 발생하는 스파터는 용접후 제거해야 하므로 용접작업의 생산성을 저하시키는 주된 요인이므로 최근 용접기 분야의 주된 연구대상은 이러한 CO₂ 아크 용접기의 용접성능 향상을 위하여 스파터의 발생을 최소화 시키는 파형제어기법에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.[1,3,6,7]

CO₂ 아크 용접기의 용융급속 이행과정은 전자기력과 용융급속의 중력, 자기불림, 표면장력 및 Pinch력등의 영향에 따라서 저전류 영역에서는 단락이행(short circuit transfer)이 발생하고 대전류영역에서는 일상이행(globular transfer)이 발생한다.[8] 이 중에서 저전류영역에서 발생하는 단락이행은 아크열에 의해

용융된 용적이 용적과 전극봉사이 에 넉을 형성하고 이것이 파 단되는 과정을 반복하는 용적이행과정으로써 특히 아크발생시 와 단락발생시에 다량의 스파터가 발생하는 것으로 알려져 있다.[1,3]

따라서 본 논문에서는 인버터 제어형 CO₂ 아크 용접기의 단락이행과정에서 발생하는 스파터를 최소화 하기위한 용접기 출력전류의 제어방식에 관하여 연구하였다.

2. 인버터 용접기의 제어원리

일반적인 인버터 아크 용접기시스템의 구조는 그림 1과 같다. 그림에서 다이오드 정류기부는 3상 220V의 교류전원을 정류하여 직류로 변환하며 이때의 DC 출력전압에는 360Hz에 해당하는 전압리플이 발생하므로 이러한 전압 리플을 최소화하기 위하여 정류기 출력단에 커패시터를 병렬로 연결하여 일정한 DC 출력전압을 얻는다. 이러한 DC 출력전압은 인버터를 통하여 고주파 형태의 교류로 변환되어 고주파 변압기의 1차측으로 인가되며 변압기의 2차측과 출력측 정류기 및 DC 리액터를 거쳐 일정한 DC 정전압 특성을 가지는 용접출력이 발생한다.

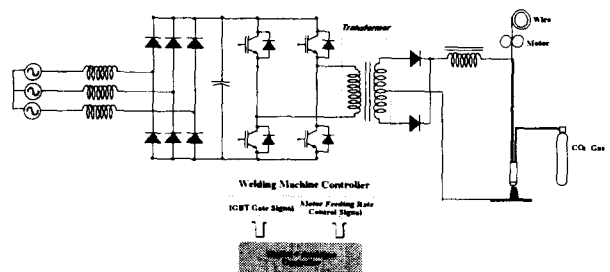


그림 1 인버터 아크 용접기 회로도

Fig. 1 Circuit diagram of inverter welding machine

* 準 會 員 : 建國大 電氣工學科 工博

** 準 會 員 : 建國大 電氣工學科 工博碩士課程

*** 準 會 員 : 建國大 電氣工學科 工博碩士課程

§ 正 會 員 : 建國大 電氣工學科 教授 · 工博

§§ 正 會 員 : 韓國生產技術研究院 · 工博

接受日字 : 1998年 6月 5日

最終完了 : 1999年 3月 15日

2.1 용접기용 인버터의 동작원리

전술한 바와 같이 교류전원으로부터 정류된 DC를 용접전류 파형제어를 위해 고주파의 펄스로 변환하기 위해서 사용되는 인버터에는 half-bridge형과 full-bridge형이 있으며 본 논문에서는 full-bridge 회로를 사용하였다.[9][10]

이러한 인버터는 스위치의 ON, OFF 상태에 따라 4가지의 동작모드로 나눌 수 있고, 변압기 1차측 전압 V_{11} 와 전류 I_{s1} 은 그 모드에 따라 달라지며 각 모드별 회로 방정식 또한 달라진다. 본 논문에서는 스위치 (S_{a+}, S_{b+}), (S_{a-}, S_{b-}), (S_{a+}, S_{b-})를 쌍으로 각 쌍의 스위치를 동시에 ON, OFF 시키는 형태인 단방향 스위칭 기법을 사용하였고 이에 따른 인버터의 회로동작 상태는 그림 2와 같다. 또한 이 때의 회로 방정식은 인버터의 출력단 전압을 V_{11} 이라 가정시 다음 식과 같이 표현할 수가 있으며 이때의 스위칭함수와 스위치의 상태 및 용접기 출력전류와의 관계는 표 1과 같다.

$$|n^{-1}SV_d(t)| = L \frac{di_{s1}(t)}{dt} + V_{11}(t) \quad (1)$$

(S:스위칭함수 (1, 0, -1), n: 변압기의 권선비)

표 1 스위칭함수와 스위치의 상태, 출력전류와의 관계
Table 1 The Relationship of Switching function, switching state and output current.

| 스위칭 함수 | 스위치 On 상태 | 출력전류 |
|--------|------------------|------|
| 1 | S_{a+}, S_{b-} | 증가 |
| 0 | S_{a+}, S_{b+} | 감소 |
| -1 | S_{a-}, S_{b+} | 증가 |

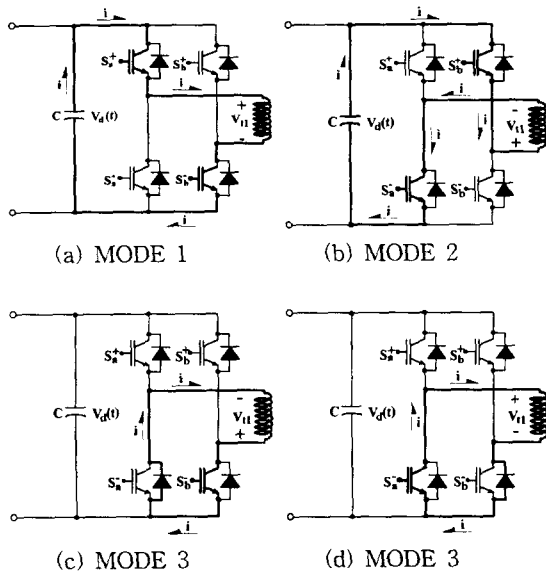


그림 2 인버터의 회로동작 모드
Fig. 2 Circuit operation mode of inverter

1) MODE 1: (S_{a+}, S_{b-} : ON)

그림 2(a)에서 스위치 S_{a+} 와 S_{b-} 가 쌍으로 On되고, S_{a-} 와 S_{b+} 는 Off된 상태에서 출력 전류가 증가되는 모드이다. 이 구간에서는 DC-Link 전압의 V_d 가 변압기 1차측에 걸리게 된다.

2) MODE 2: (S_{a+}, S_{b+} : ON)

그림 2(b)에서 스위치 S_{a+} 와 S_{b+} 이 쌍으로 On되고 S_{a-} 와 S_{b-} 는 Off된 상태에서 전류 증가 모드이다. 이 구간에서는 DC-Link 전압 V_d 가 변압기 1차측에 역으로 걸리게 된다. 따라서 반대방향으로 전류가 증가되나 출력단 정류기에 의해서 정류되므로 전류증가모드이다.

3) MODE 3: (S_{a-}, S_{b+} : ON)

그림 2(c), (d)의 회로동작 상태를 가지는 전류감소모드로써 이 모드에서는 출력전압 V_d 가 출력측으로 전달되지 않고 인버터가 Off되는 구간이다. 그림에서와 같이 스위치 S_{a-} 와 S_{b+} 에 동시에 ON 신호가 주어지나 이전의 전류의 흐름방향에 따라서 스위치의 동작상태가 결정된다. 만약 스위칭 함수가 (1 → 0)으로 변화하였다면 회로의 도통상태는 Fig. 2(c)와 같이 되고 스위칭 함수가 (-1 → 0)으로 변화하였다면 회로의 도통상태는 Fig. 2(d)와 같이 동작된다.

3. 디지털 제어방식의 순시전류 제어기 구현

본 논문에서는 CO₂ 인버터 아크 용접기의 단락이행과정에서 발생하는 스파터가 단락이 발생하는 순간과 아크발생시에 주로 발생하므로 용접기 출력전류의 파형을 최적의 전류파형으로 제어하기 위한 순시전류제어방식에 관하여 연구하였다.

단락이행시의 출력전류를 순시적으로 제어하기 위해서는 기존의 정전압 출력특성을 가지는 용접기의 제어부와는 달리 용접기의 출력전압을 센싱하여 단락여부를 판정하고, 단락구간에서는 순시적으로 용접기의 단락전류를 제어하기 위한 전류 기준신호를 출력하여야 한다. 이상과 같은 제어를 수행하기 위해서는 아날로그 방식의 제어기를 사용할 경우 순시적으로 용접기의 기준전류를 출력하기가 불가능하고 더욱이 용접기의 시퀀스에 따라 순차적인 릴레이들을 구현하기 위해서는 다수의 릴레이 소자들을 사용해야하며, 용접기 제어요소들을 변경시에는 회로를 다시 설계하여야하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 단락이행시 순시적으로 전류 기준신호를 출력하기 위한 용접기의 제어부를 싱글칩 마이크로프로세서를 이용한 디지털 제어기로 구성하여 설계, 제작하였다.

인버터 용접기에 사용한 마이크로프로세서는 연산속도가 빠르고 주위환경에 대한 내구성이 강하며 hard-ware 구성이 간단하고 A/D 변환기가 내장되어 있는 80C196KC를 제어용 마이크로프로세서를 사용하였다.

3.1 단락이행시 순시전류제어기의 블록선도

그림 3은 본 논문에서 연구된 순시전류 제어기의 제어부 블록선도로서 그림에서 알 수 있듯이 제어부는 용접상태에 따라 출력모드를 선택하고 출력모드별 출력전류의 기준신호를 출력

하는 디지털 제어부와 이러한 출력전류 기준신호를 인버터 스위칭 함수로 변환하기 위한 PI 전류제어기와 PWM 변조부로 구성되어 있는 아날로그 제어부로 구성되어 있다.

따라서 그림에서 보이는 전류제어기는 단락이행과정인 단락상태와 아크상태에서의 용접기 출력전류를 순시적으로 제어하기 위하여 용접기의 출력전압인 V_{Real} 을 센싱하여 단락판정전압인 10V보다 적으면 단락모드로 판정하고 이때부터 용접기의 출력전류가 추종해야하는 전류 기준신호를 디지털 제어기에서 출력한다. 단락이 발생시에는 용접기 모재에 단단히 부착되기 위하여 일정시간동안(2~3 msec)의 최소의 전류값인 base전류로 기준 전류신호를 출력하고, 지연시간이후 모재와 붙어있는 단락기등을 파단하고 새로운 단락상태를 만들기 위하여 전류를 급격히 상승시키며 상승치에 출력전류가 도달하면 전류상승의 기울기를 제어한다. 이때 단락되어 있던 단락기등이 파단되어 아크가 발생하면 출력전압이 상승하므로 이를 감지하여 아크시의 최적전류로 기준전류신호를 출력하여 다음 단락모드를 발생시킨다.

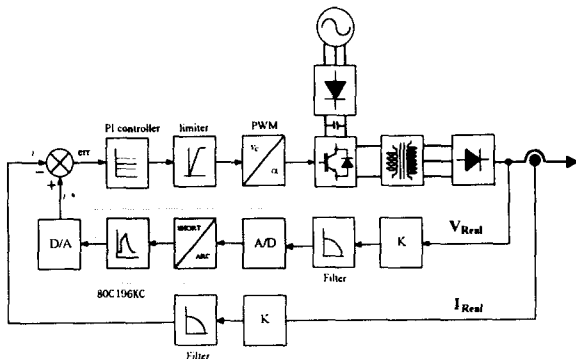
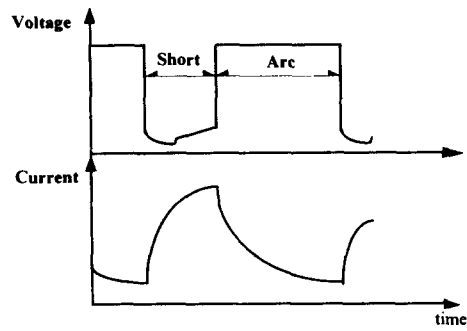


그림 3 인버터 아크 용접기 제어 블록선도
Fig. 3 Control block diagram of proposed welding machine

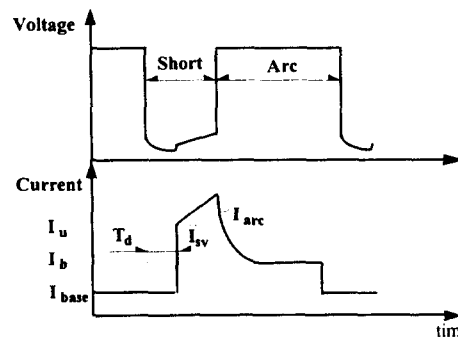
그림 4는 제안된 순시전류 제어방식에 의한 용접기 출력전류와 기존의 아크 용접기의 출력전류의 개념도로서 그림 (a)의 기존의 제어방식의 경우에는 정전압 제어방식을 이용하함에 따라 단락이 발생시 출력전류파형이 단락순간부터 증가함을 알 수 있다. 그림 (b)의 순시전류 제어방식에 의한 용접기의 경우에는 단락발생시 출력전류가 단락기등 형성을 위하여 일정한 지연시간 동안 저전류로 유지된후에 상승함을 알 수 있다. 제안된 CO₂ 아크 용접기의 순시전류 제어방식은 전술한 바와 같이 고속카메라의 촬영을 이용한 분석을 통하여 용접시 발생하는 스파터가 단락이 일어나는 순간에 다량으로 분출되므로 이러한 단락발생순간에 출력전류를 감소시킴에 의하여 스파터 발생을 최소화하는 제어방식이다.[2][6][7]

이러한 출력전류파형의 제어 가능한 변화요소로는 단락발생시의 지연시간 T_d , 지연시간이후 상승시킬 단락전류 상승치 I_u , 단락전류의 상승기울기 I_{sv} , 아크발생후 전류감소 기울기 I_{arc} 및 아크시의 출력전류(base 전류) I_b 등이 있다.

이상의 전류파형의 제어요소는 80C196KC의 프로그램을 조정함에 따라 임의로 지연시간과 출력전류의 크기 및 출력 전류의 증가, 감소 기울기의 조절이 가능하다.



(a) 기존의 용접기 출력전압 및 전류



(b) 제안된 용접기 출력전압 및 전류

그림 4 용접기 출력전압 및 전류 개념도
Fig. 4 Current and voltage waveform of welding machine

3.2 단락이행과정의 전류제어 순서도

전술한 제어동작을 수행하기 위하여 프로그램에 의해 동작하는 디지털 제어부는 크게 시스템 초기화부, A/D 인터럽트 서비스부와 기준전류파형을 발생 및 제어하는 부분으로 구성되어 있다.

초기화부에서는 각종 변수들을 초기화하고 프로세서의 동작환경 및 샘플링주기를 결정하며 8255등에 대한 초기화를 수행하고 타이머 인터럽트를 가능하게 해주며 대기하는 부분으로써전체 샘플링 주파수는 소프트 타이머를 이용하여 200uS간격으로 인터럽트를 발생시켜 5kHz 샘플링을 구현하였다.

A/D 인터럽트 서비스 부분은 A/D 변환 시작 신호에 기인한 변환완료 인터럽트로서 실제로 전압과 전류를 A/D로부터 읽어들이 디지털 제어기의 CPU에서 실제 사용할 변수들의 값을 저장하는 역할을 하는 부분이다.

그림 5는 기준전류파형을 생성 및 제어하는 부분으로써 토치스위치의 상태를 판별하여 운전과 정지의 결정 및 샘플링된 전압을 가지고 단락과 아크를 판별하여 기준전류의 파형을 생성하여 D/A로 출력한다. 또한 A/D로부터 입력을 받기위하여 A/D 컨버전 시작신호를 주고 A/D 인터럽트를 대기상태로 만들어 준다. 또한 단락이행구간내에서 기준전류의 파형을 실제로 출력하는 부분이다.

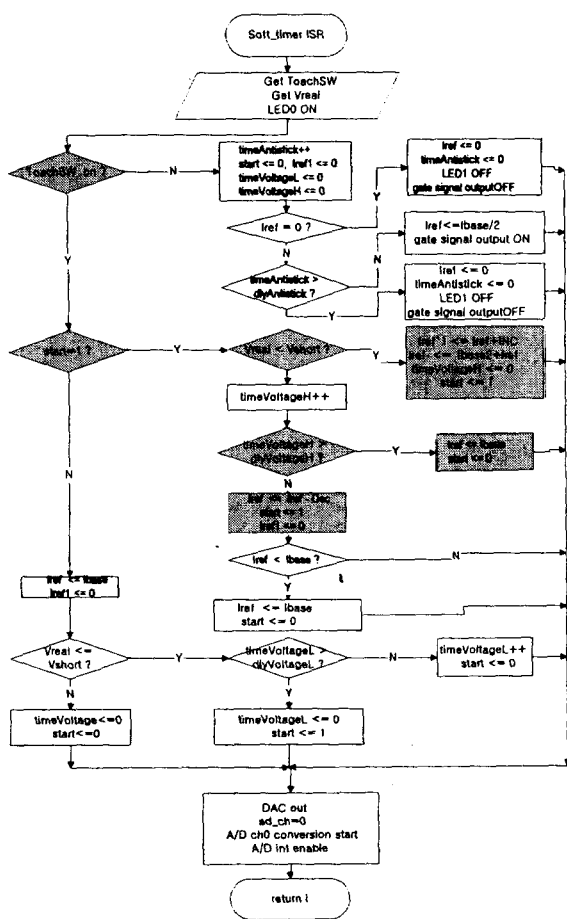


그림 5 제안된 용접기의 제어 흐름도
Fig. 5 Control flowchart of proposed welding machine

4. 실험결과 및 검토

본 절에서는 순시전류 제어방식에 의한 인버터 아크 용접기의 용접성능 향상특성을 스파터 발생량과 순간단락 발생 횟수 측면에서 기존의 인버터 아크 용접기와 비교, 분석하였다.

순시전류 제어방식에 의한 용접기의 기준전류파형의 제어 요소는 아래 표 2와 같고 이러한 제어요소는 프로그램에 의하여 가변이 가능하도록 시스템을 구성하였다. 표 2에 나타난 각 제어요소의 값은 실험을 통하여 최소의 스파터가 발생하는 조건이다.

표 2 제안된 순시출력전류 제어방식의 제어요소 파라미터
Table 2 Control parameter of proposed control method

| 제 어 요 소 | 설정값 |
|----------------------|-------------|
| 지 연 시 간 T_d | 3 msec |
| Base 전류 I_{Base} | 100 A |
| 단락전류 최대치 I_u | 250 A |
| 아 크 전 류 I_b | 150 A |
| 단락전류 상승기울기 I_{sv} | 57.5 A/msec |
| 아크전류 하강기울기 I_{arc} | 60.5 A/msec |

표 3은 실험에 사용된 용접조건으로써 성능비교를 위하여 범용 인버터 아크 용접기와 연구된 순시전류 제어방식에 의한 용접기의 용접조건을 동일하게 설정하고 실험을 수행하였다.

표 3 용접조건
Table 3 Welding Condition

| 용 접 조 건 | 1.2 mm Si-Mn solid |
|-------------|--------------------------|
| 모재의 크기 | 300 × 100 × 6 mm |
| 용접속도 | 500 m/min |
| 와이어 피더속도 | 5 m/min |
| 모재와 팁사이의 간극 | 15 mm |
| 차폐가스 | CO ₂ 15 l/min |
| 평균용접전압 | 22 V |

그림 6과 7은 기존의 범용 인버터 아크 용접기와 본 논문에서 제안된 용접기의 출력전압과 전류파형으로써 용접기 출력전류와 출력전압을 각각 230A, 22V로 설정하여 실험하였다.

그림 6은 0.5초동안의 전압 및 전류의 비교 파형으로써 제안된 제어방식을 사용한 용접기의 전압파형과 전류파형이 기존의 용접기에 비하여 현저하게 규칙적임을 알 수 있고 이는 용접기 출력전류제어가 원활히 수행됨에 따라 단락주기가 일정해지기 때문이다. 특히 그림 6(a)의 기존의 범용 용접기에서의 출력전류파형을 관찰하면 단락주기가 일정하지 않음에 따라 단락전류의 주기가 불규칙하고, 단락전류의 피크치의 크기도 균일하지 않음을 볼 수 있다. 그림 6(b)의 순시전류 제어방식 용접기의 경우에는 균일한 단락주기와 단락전류의 피크치의 크기가 거의 일정함을 관찰할 수 있고, 이러한 일정하고 규칙적인 단락주기는 순간단락 횟수를 감소시킬 수 있고, 따라서 순간단락현상에 의한 스파터 발생을 감소시킬 수 있다. 출력파형의 비교를 통해서도 순간단락 횟수의 경우 기존의 용접기에 비하여 제안된 용접기가 현저하게 감소되었음을 확인할 수 있다.

그림 7은 그림 6의 파형을 0.1초의 시간으로 확대한 파형으로 전술한 바와 같이 파형에서 단락순간의 시간지연요소과 단락전류의 기울기 및 아크 전류시의 기울기가 원활히 제어되고 있음을 관찰할 수 있다.

그림 8은 그림 6과 7의 용접전압, 전류의 V-I 파형으로써 2초동안 10,000개의 출력전압과 전류 데이터를 이용한 히스토그램이다. 그림 8(a)의 기존의 인버터 용접기의 경우 그림에 나타난 바와 같이 정상적인 단락이행 이외에 다수의 순간단락현상의 발생으로 인하여 규칙적인 모양이 이루어지지 않고 전압과 전류의 궤적내부에 많은 직선이 나타남을 볼 수 있다. 본 논문의 순시전류 제어방식에 의한 용접기의 경우인 그림 8(b)는 순간단락현상이 현저하게 감소함을 볼 수 있으며 단락을 유도하기 위해 아크전류를 변화시켰던 알고리즘에 의해 단락이 발생하는 시점이 2가지 경우로 나타나는 것을 볼 수 있다. 또한 순간단락이 발생하더라도 전류가 상승되지 않으므로 기존 용접기의 경우와는 달리 출력전압과 전류의 궤적내부에 직선이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있다.

수 있다.

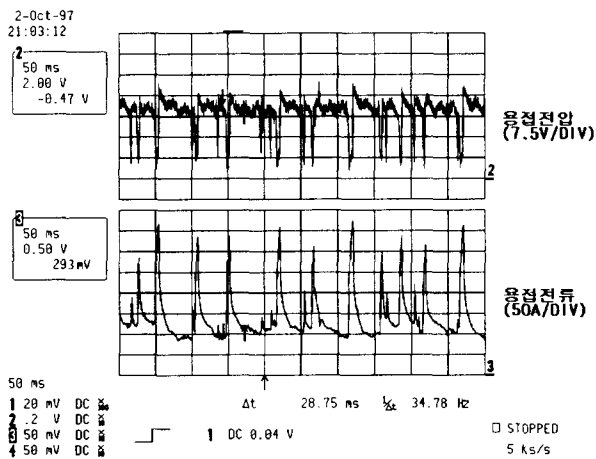
그림 9는 제안된 용접기의 용접성능평가를 위하여 용접전압의 데이터를 통한 단락시간의 히스토그램으로써 용접기에서 나타나는 단락현상은 단락구간이 1.5msec이상인 정상적인 단락현상과 단락구간이 1.5msec이내인 순간단락현상으로 나눌 수 있으며 이 중에서 순간단락현상은 정상적으로 일어나는 용적이행 현상이 아니므로 용접성능을 저하시키는 요인이다. 그림 9의 (a)와 (b)를 비교하면 순시전류 제어방식을 통하여 1.5msec이내의 주기로 발생하는 순간단락현상이 현저하게 감소됨을 알 수 있고 이는 제안된 제어방식의 경우 출력전류제어를 통하여 규칙적인 단락주기가 지속적으로 유지되기 때문이다.

이상의 실험결과를 바탕으로 기존의 인버터 아크 용접기와 순시전류 제어방식에 의한 용접기의 비교를 위하여 2초 동안

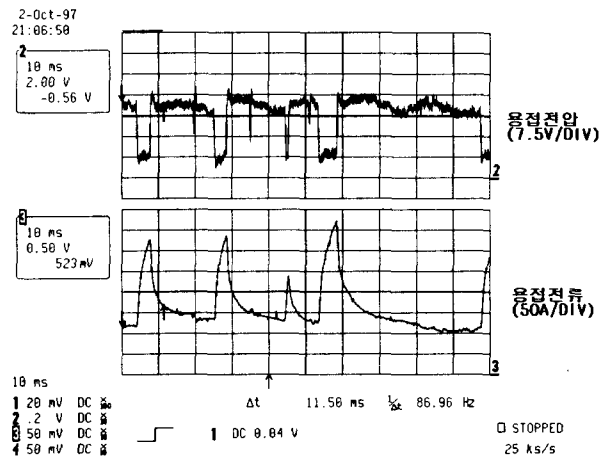
10,000개의 데이터를 사용하여 표 4와 같이 용접성능을 나타내었다. 표 4에서 순간단락비는 아래 식(2)를 사용하여 구하였다.

$$\text{순간단락비} = \frac{\text{순간단락의갯수}}{\text{단락의갯수}} \quad (4)$$

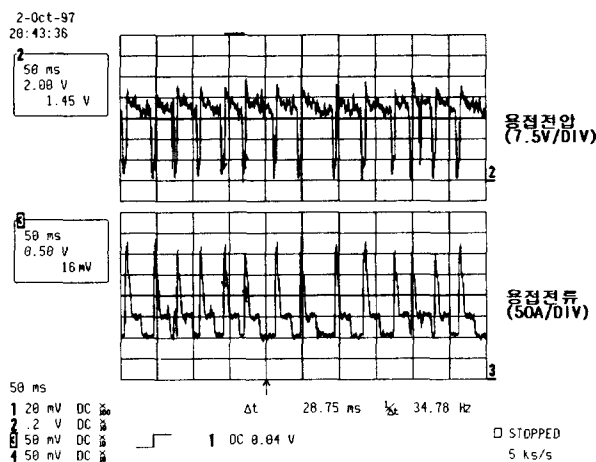
표에 나타난 바와 같이 기존의 용접기의 경우에는 단락횟수는 많으나. 순간단락이 많이 발생하여 실제 정상적인 단락횟수는 순시전류 제어방식과 큰 차이가 없음을 알 수 있고, 식 (4)에 의한 순간단락비는 기존의 용접기에 비하여 89.15%나 감소하였다. 아크의 안정성을 평가하는 지표인 변동계수도 33%나 감소하였으므로 안정된 아크가 유지되었음을 확인할 수 있었고, 스파터 발생측면에서도 28%의 저감효과가 있었다.



(a) 범용 인버터 용접기

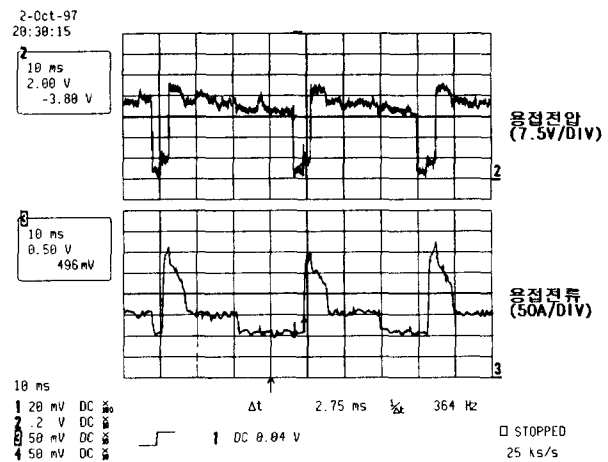


(a) 범용 인버터 용접기



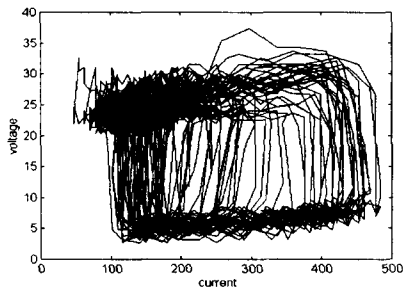
(b) 제안된 순시 출력전류제어방식의 인버터 용접기

그림 6 출력전압 및 전류파형 (50 msec/div)
Fig. 6 Voltage and current waveform(50 msec/div)

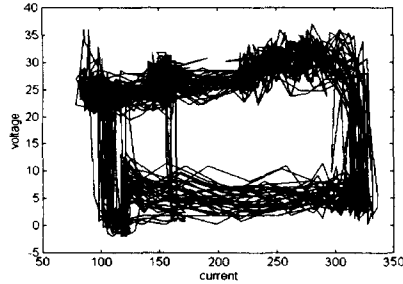


(b) 제안된 순시 출력전류제어방식의 인버터 용접기

그림 7 출력전압 및 전류파형 (10 msec/div)
Fig. 7 Voltage and current waveform(10 msec/div)



(a) 범용 인버터 용접기



(b) 제안된 순시 출력전류제어방식의 인버터 용접기

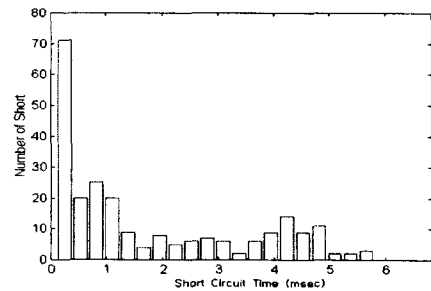
그림 8 인버터 용접기 출력전압 및 전류과정
Fig. 8 V-I Curve of inverter welding machine

표 4 용접성능 비교
Table 4 Comparison of Welding Performance

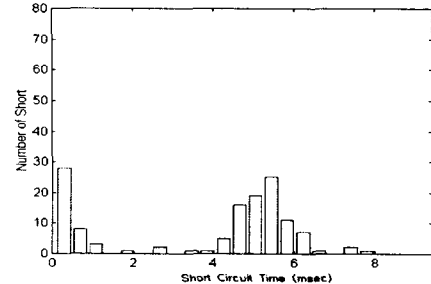
| 구 분 | 범용 인버터 용접기 | 제안된 용접기 |
|---------------|-------------|-------------|
| 총 단락횟수 | 89 Times | 46 Times |
| 순간단락횟수 | 46 Times | 8 Times |
| 정상 단락 급속이행 횟수 | 43 Times | 38 Times |
| 평균 아크시간 | 20.6 [msec] | 38.2 [msec] |
| 아크시간 변동계수 | 0.7718 | 0.5157 |
| 평균 단락시간 | 1.7 [msec] | 4.4 [msec] |
| 단락시간 변동계수 | 1.0698 | 0.2105 |
| 스패터 발생량 | 4.0 g | 2.9 g |

5. 결 론

본 논문에서는 단락이행시의 용접성능 향상을 위한 순시 전류제어방식에 의한 용접성능 향상을 목적으로 제어시스템을 구성하였다. 인버터 시스템 제어를 위한 제어기로 마이크로프로세서인 80C196K를 이용한 디지털 제어기를 설계, 제작하여 실험을 수행하였고, 그 결과 개발된 용접기 시스템의 경우 기존의 인버터 용접기와는 달리 출력전류의 제어요소를 프로그램에 의하여 변환하는 것이 가능하고, 단락이행시 순시적으로 출력전류를 제어하는 것이 가능하였으며, 더욱이 이상의 제어를 통하여 안정된 단락주기의 형성, 순간 단락비 감소, 아크시간의 변동계수 향상 및 스패터 발생을 억제하는데 효과적인 결과를 얻을 수 있었다.



(a) 범용 인버터 용접기



(b) 제안된 순시 출력전류제어방식의 인버터 용접기

그림 9 단락시간의 히스토그램
Fig. 9 Hystogram of short circuit time

향후의 이상의 순시전류제어방식을 바탕으로 단락이행과정에서의 스패터발생을 최소화하고 용접성능을 향상시키기 위하여 다양한 실험을 통한 제어요소의 최적화를 도출하는 것이 필요하다고 생각된다.

감사의 글

본 연구는 공업기반기술 사업비로 수행되었기에 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [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] E. K. Stava, "Low spattre welding", *Australasian Welding Journal*, 4th Quarter, p. 21, 1995.
- [3] 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.
- [4] S. Liu and T. A. Siewert, "Metal transfer in gas metal arc welding : Droplet rate", *Welding Journal*, Vol.68, No.2, p. 52, 1989.
- [5] J. A. Johnson, et. al, "Process control of GMAW : Sensing of metal transfer mode", *Welding Journal*, Vol.70, Nol.5, p. 91, 1991.
- [6] H. Yamamoto, rt.al, "The Development of Welding Curr

ent Control Systems for spatter reduction", *Welding International*, Vol.4, No.5, p. 398, 1990

[7] T.Mita, "Reduction Spatter in CO₂ Gas-Shielded Arc Welding Waveform Control", *Welding International*, Vol.3, p. 227, 1989.

[8] J. F. Lancaster, *The Physics of Welding*, 1984.

[9] J. Zubak, et.al, "Pulsewidth Modulated Inverter Motor Drives with Improved Modulation", *IEEE Trans. Ind Appl.*, vol.IA-11, p. 101, Nov./Dec. 1975.

[10] Joachim Holtz, "Pulsewidth Modulation - A Survey", *IEEE PESC.*, p. 11, 1992.

저 자 소 개



채 영 민 (蔡榮敏)
 1967년 2월 24일생. 1993년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 졸업(석사). 1999년 동대학원 졸업(공박). 현재 인버터제어기술센터 선임연구원.

Tel : (02) 450-3486
 E-mail : chaeym@kkucc.konkuk.ac.kr



목 형 수 (睦亨洙)
 1963년 10월 31일생. 1986년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동대학원 졸업(석사). 1992년 동대학원 졸업(공박). 1995~1997 서울산업대 조교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 조교수.

Tel : (02) 450-3479
 E-mail : hsmok@kkucc.konkuk.ac.kr



고 재 석 (高再錫)
 1967년 4월 3일생. 1994년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 졸업(석사). 현재 동대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 450-3486
 E-mail : ghojs@kkucc.konkuk.ac.kr



최 규 하 (崔圭夏)
 1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동대학원 졸업(석사). 1986년 동대학원 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 객원교수. 현재 건국대 공대 전기공학과 교수.

Tel : (02) 450-3486
 E-mail : ghchoe@kkucc.konkuk.ac.kr



구 자 열 (具滋悅)
 1974년 3월 24일생. 1997년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 건국대 공대 전기공학과 대학원 졸업(석사).

Tel : (02) 450-3486



김 희 진 (金喜珍)
 1953년 10월 10일생. 1975년 서울대 공대 금속공학과 졸업. 1978년 동대학원 졸업(석사). 1982년 Univ. of California, Berkeley 졸업(공박). 현재 한국생산기술연구원 생활산업기술개발센터 소장

Tel : (0417) 560-8641
 E-mail : kimhj@kitech.re.kr