

입력전류 제어형 고효율 인버터아크용접시스템의 입력 및 출력 특성연구

崔圭夏

Input and Output Characteristics of Input Current Controlled Inverter Arc Welding Machine with High Efficiency

Gyu-Ha Choe

요 약

얇은 판형 용접에 광범위하게 사용되는 피복아크 용접기는 용접전원으로 변압기를 사용하는 AC 아크용접기와 인버터를 사용하는 인버터 아크 용접기로 구분된다. AC아크용접기는 변압기를 사용하므로 전체시스템의 부피 및 무게가 커지며 변압기 탭조정으로 인한 최적 출력전압이 설정되지 않아 용접성능이 저하되는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하고 용접성능을 향상시키기 위하여 고속반도체 소자를 이용한 인버터 아크용접기가 많이 연구되고 있다. 인버터 피복아크 용접기시스템은 다이오드 정류기, 인버터, 고주파 변압기, 출력측 정류기 및 리액터로 구성되어 있는데, 입력전원측에 다이오드 정류기를 사용함으로써 고조파 다량 함유 및 입력역률 저하등을 가져오며, 일정 듀티를 갖는 정전압제어방식을 이용하고 아크용접시스템 고유의 정전류특성은 변압기의 누설구조에 의해 실현하고 있다. 따라서 본 논문에서는 이상의 단점을 해결하기 위하여 PWM 컨버터를 적용하여 입력측의 고조파를 제거하고 입력역률을 99% 유지할 수 있었으며, 또한 새로운 혼형제어기법을 적용하여 순시적인 용접 출력전압과 전류를 제어하여 용접 출력전압과 전류를 일정하게 유지시킴으로서 AC아크용접기와 비교하여 스패터를 70%감소시켰으며 무부하시 10%의 효율 상승을 가져왔다

ABSTRACT

Shielded metal arc welding machines with AC transformer have been widely used for thin-plate welding applications. Because of being bulky, heavy and of tap-changing property, so the SMAW's are changing to new power electronic circuits such as inverter circuit in order to reduce the system size and also to improve the welding performances at input and output sides. The PWM inverter arc welding machine with diode rectifier has better output welding performances but it has the plentiful harmonics and the lower input power factor. To solve these problems, input current-controlled scheme is considered for PWM inverter arc welding system, and then total input power factor is maintained to be more than 99%. Also a new combined control is proposed which can control both instantaneous welding output voltage and current under constant power conduction, and as a result the variations of instantaneous current and voltage can be reduced to very narrow range in the V-I curve relationship, and hence the variance of welding current and voltage become so reduced. In addition the spatter generated during welding process is greatly reduced up to 70%. And the overall efficiency can be improved up to 10%, which becomes higher when the load is lower.

Key Words : SMAW, inverter arc welding machine, voltage control, current control, combined control, PWM converter, high power factor

1. 서 론

얇은 판형 용접에 광범위하게 사용되는 아크용접기는 전극에 따라 피복 아크용접과 탄소 아크용접으로 구분되는데, 피복용접봉을 쓰는 피복 아크용접기가 주로 사용된다. 이러한 피복 아크용접기는 용접전원으로 변압기를 사용하는 AC 아크용접기와 인버터 등을 사용하는 인버터 아크용접기로 구분된다.

이중 AC 아크용접기는 변압기를 이용하는 단순한 구조 때문에 고장이 적고 가격이 낮은 장점은 있으나, 전체시스템의 부피 및 무게가 커지는 단점도 있다. 또한 변압기 탭조정으로 인하여 최적 출력전압이 설정이 용이하지 않아 용접성능이 저하되고 때로는 용접자의 숙련도에 출력특성이 크게 종속된다. 뿐만 아니라 이 때문에 용접시 아크가 불안하며 무부하시 높은 단자전압으로 인한 전격이 우려되며, 1차 무부하전류 때문에 효율 및 역률이 저하되는 단점이 있다. 이러한 단점을 개선하기 위해 근래 피복아크 용접에서 스페터, 비드, 아크의 안정성 등의 관점에서 용접성능을 향상시키고 또한 고효율, 고역률 및 소형, 경량화시키기 위하여 고속반도체 소자를 이용한 인버터 아크용접기가 많이 연구되고 있다.^[1-6]

인버터 피복아크 용접시스템은 다이오드 정류기, 인버터, 고주파 변압기, 출력측 정류기 및 리액터로 구성되어 있는데, 다이오드 정류기에 의한 고조파의 나랑 함유, 입력역률저하 등의 단점이 있다. 또한 인버터 아크용접시스템의 경우 일정 듀티를 갖는 전압 즉, 정전압 제어방식을 이용하고 아크용접시스템 고유의 정전류특성은 변압기의 누설구조에 의해 실현하고 있다.

따라서, 본 논문에서는 이상의 단점인 낮은 입력 역률, 많은 고조파의 함유를 개선하고 변압기의 구조에 의존하는 정전압제어방식의 단점을 해결하기 위하여 PWM 컨버터의 적용과 새로운 혼용제어를 제안하고자 한다. 혼용제어는 용접기의 출력특성을 제어할 목적으로 전압·전류를 동시에 제어함으로써 궁극적으로 전력을 일정하게 유지시키고 따라서 정전력제어를 수행하는 방식이다.

이상과 같이 제안하는 혼용제어를 갖는 인버터 아크용접시스템을 기존의 정전압제어, 정전류제어와 비교 검토하였으며 제안된 혼용제어의 제어특성을 검토하기 위해 인버터 용접시스템을 이론적 및 실험적으로 고찰하였다. 또한 용접전압 및 전류의 순시특성, 스페터 발생특성, 효율 등의 특성도 조사하였다.

2. 입력전류제어형 고효율 인버터 아크 용접시스템

기존 인버터 아크용접기에서 입력전류의 역률 및 고조파특성을 개선할 목적으로 PWM컨버터에 의해 입력전류를 제어하고 또한 아크용접시스템에서 전압 및 전류를 동시에 제어하는 전력제어(이하 혼용제어라고 함)에 의해 고효율화를 추구하였다.

2.1 PWM 컨버터

그림1(a)의 PWM컨버터에 의해 교류측 전류를 제어함으로써 입력역률을 1에 가깝게 유지하고 또한 전류의 고조파성분 또는 파형률을 크게 개선할 수 있다. 실제의 동작시 인버터의 입력인 직류링크전압을 일정하게 제어한다.

PWM컨버터에 대한 스위칭함수를 $S_{CON}(t)$ 라고 하면 스위치의 조합상태에 따라 달라지며 실제 (+1, 0, -1)의 3상태 중 하나로 된다. v_s, i_s, v_c 를 각각 전원전압 및 전류, 직류링크전압이라 하고 v_{CON} 은 PWM컨버터의 교류측 전압이라 할때 PWM컨버터제어에 관련된 몇 가지 식들은 다음과 같다.

$$v_s(t) = R_s i_s(t) + L_s \frac{di_s(t)}{dt} + v_{CON}(t) \quad (1)$$

$$v_{CON}(t) = S_{CON}(t) v_c(t) \quad (2)$$

$$i_{DC}(t) = S_{CON}(t) i_s(t) \quad (3)$$

$$v_c(t) = \frac{1}{C_{DC}} \int [i_{DC}(t) - i_L(t)] dt \quad (4)$$

(단, R_s 는 전원측 저항이며 L_s 는 전원측 인덕턴스임.)

위의 식을 상태방정식으로 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} L_s i_s(t) \\ C_{DC} v_c(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -R_s & -S_{CON}(t) \\ S_{CON}(t) & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_s(t) \\ v_c(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_s(t) \\ i_L(t) \end{bmatrix} \quad (5)$$

이상의 관계로부터 PWM컨버터의 전체 제어블럭선도를 구하면 그림1(b)와 같고, 전압제어 및 전류제어에 대한 2개의 루프를 갖는다. 전자의 전압제어루프는 컨버터의 출력전압 즉 직류링크전압을 일정하게 유지하도록 제어하고, 후자의 전류제어루프는 입력전류를

단위역률을 갖는 정현파로 제어한다. 이때 전압 및 전류에 대한 제어기는 모두 PI제어기를 사용하였고 이로써 간단하면서도 제어능력이 우수한 제어기법을 구현할 수 있었다. 전압제어의 이득은 최대역률 및 최저 THD조건에서 얻어지며, 전류제어의 이득은 전류제어의 속응성 조건에서 얻어진다. 이러한 이득값의 결정은 그림4에서 설명하고 있다.

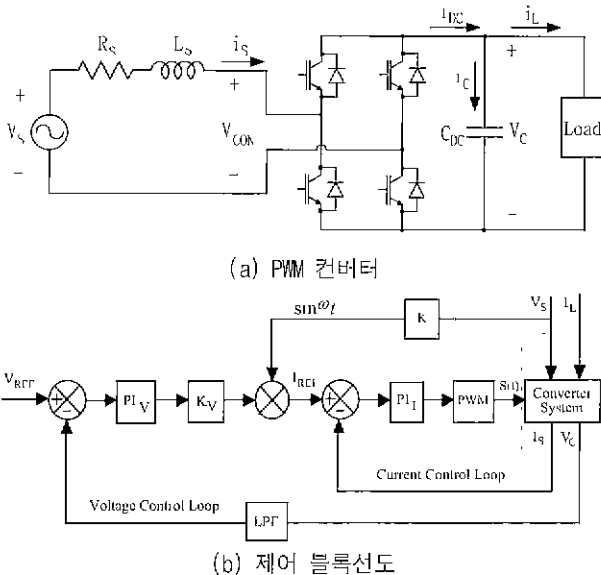


그림 1 PWM 컨버터의 전력회로 및 제어블럭선도
Fig. 1 Power circuit and control block diagram of PWM converter.

2.2 용접출력특성

일반적으로 용접기는 정전류 출력특성을 갖고 기준 용접기에서는 정전류특성을 누설변압기에 의해 구현하였다. 누설변압기에 의존하는 하드웨어적 방법에서는 원하는 정전류 특성을 갖도록 하는 누설변압기의 설계가 매우 중요하였다. 그러나 PWM인버터를 사용하면 용접기의 출력특성을 다양하게 변화시킬 수 있는데, 본래의 정전류특성 뿐만 아니라 정전압 또는 정전력의 특성까지 갖도록 제어할 수 있다. 이처럼 PWM인버터에 의해 용접시스템의 제어특성이 크게 달라지며 또한 최종용접품질에도 큰 영향을 미치게 된다.

아크용접시스템의 출력특성을 전압-전류특성곡선으로 나타내면 그림2(c)와 같고 크게 3개의 특성 즉 정전류, 정전압 및 정전력특성으로 각각 구분할 수 있으며, 실제 용접이 이루어질 때는 용접전원의 출력특성곡선과 아크 전압-전류 특성곡선의 교점에서 용접 전압 및 전류가 결정된다.

우선 정전력특성을 갖는 동작점 P에서의 전압 및 전류의 증분을 생각해 보자. 전압의 증분을 ΔV , 전류증분을 ΔI 라고 하면 점P에서의 기울기는 $\beta = -\frac{\Delta V}{\Delta I}$ 로 표현되는데 정전력특성으로 제어될때 정상상태에 놓이면 전압 및 전류가 정격치 근처에서 제어되므로 그 기울기는 거의 일정하게 유지된다고 할 수 있다. 또한 정전압특성을 갖는 동작점 Q에서는 전압증분은 0으로 되면서 전류증분만이 나타나고, 반대로 정전류동작점 R에서는 전류증분은 0으로 되면서 전압증분만 음으로 나타난다. 정전력 동작점에서는 이 두 증분으로 표현되므로 정전압특성과 정전류특성을 동시에 갖는 것으로 볼 수 있다. 이러한 제어는 정전력제어가 되고 전압 및 전류를 동시에 제어한다는 관점에서 혼형제어라고 할 수 있다.

2.3 PWM 인버터

PWM컨버터에서 일정하게 제어된 직류링크전압은 PWM인버터의 입력으로 전달되고 인버터의 출력은 정전압 변압기 및 2차측 정류부와 직류리액터를 거쳐 용접단에 최종 출력된다.

인버터의 경우 직류링크전압 V_C 가 인버터의 스위칭 함수 $S_{INV}(t)$ 에 의해 변압기 1차전압 $v_T(t)$ 로 변환되고 변압기의 2차전압 $v_R(t)$ 은 정류회로 및 리액터를 거쳐 용접기 출력전압 $v_{WEL}(t)$ 으로 바뀌어 용접단에 인가된다. 그림2(a)에 인버터 출력단만을 나타내었으며 이상의 관계를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$v_T(t) = \frac{1}{C_B} \int i_T dt + R_T i_T(t) + L_T \frac{di_T(t)}{dt} + a v_R(t) \tag{6}$$

$$v_{DC}(t) = R_{DC} i_{WEL}(t) + L_{DC} \frac{di_{WEL}(t)}{dt} + v_{WEL}(t) \tag{7}$$

(단, R_T 는 변압기 권선저항이며 L_T 는 변압기 인덕턴스임)

여기서, 변압기 1차전압 $v_T(t) = V_C S_{INV}(t)$, 정류회로의 출력전압 $v_{DC}(t) = S_{REC}(t) v_R(t)$ 이다. 그런데, 용접 전압 및 전류의 관계는 대단히 비선형적인 특성을 가지므로 이론적으로 분석할 수 없고 여기서는 실험적으로 대신하였다.

그림2(c)은 용접전원의 특성곡선을 보여준다. 용접특성곡선상 점 P에서의 기울기 β 를 써서 인버터 출력전압 V_{INV} 을 표현하면 다음과 같다.

$$V_{INV} = V + \beta \cdot I \quad (8)$$

(단, V 는 용접전압이며 I 는 용접전류임.)

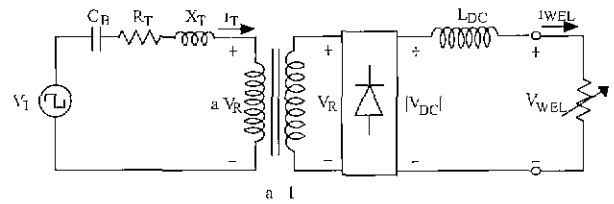
용접전압 및 전류를 결정하면 제어부에서 실제 출력 전압 및 출력전류가 이를 추종하도록 구성되어야 하므로 인버터의 기준값에 대해 실제 인버터 출력값을 검출하여 독립적으로 피드백제어를 해야 한다.

그러나 실재적으로 출력전압과 출력전류를 동시에 실시간으로 제어하면서 식(8)을 만족하는 인버터전압 V_{INV} 을 계산해내는 것은 어려운 문제이다. 따라서 본 연구에서는 용접전압 및 전류를 각각 기준값에 추종하도록 전압 및 전류제어기를 두고 동작점 $P(I_{WEL}, V_{WEL})$ 에 대한 기울기 β_{WEL} 에 의한 가중치를 주어 인버터 출력전압을 결정할 수 있다.

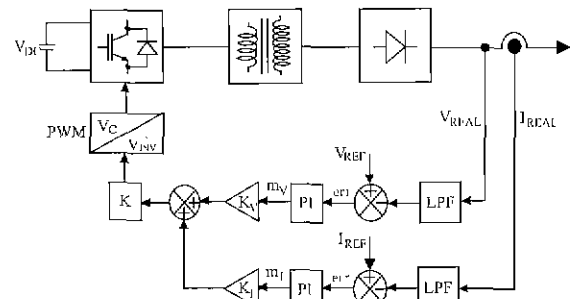
이상의 동작을 위해 제어기구성을 그림2(b)와 같이 하였다. 용접전압 또는 전류 V_{REAL}, I_{REAL} 을 실제 검출하고 각각 적절한 저역통과필터(LPF)에 의해 스위칭주파수성분을 제거한 후 전압 또는 전류제어기에 의해 용접전압 및 용접전류의 용접조건을 만족하는 기준값 V_{REF}, I_{REF} 을 각각 추종하도록 제어한다. 제어블럭선도에서 가중치 K_V, K_I 에 따라 실제 인버터의 인가 신호 V_{INV}^* 가 결정된다. 즉, 임의의 K_V, K_I 에 대해 항상 $K_V + K_I = 1$ 를 만족하도록 하고 $K_I = 0$ 및 $K_V = 1$ 으로 하면 용접시스템은 전압원으로 동작되고, $K_V = 0$ 및 $K_I = 1$ 로 하면 전류원으로 동작된다. 또한 $K_V > 0, K_I > 0$ 으로 하면 용접시스템은 전력원으로서 동작되는데, 이 경우의 가중치 K_V 및 K_I 의 적절한 설정이 필요하며 전술한 바와 같이 동작점의 기울기에 의해 결정된다. 이들 값은 또한 용접기에 따라 달라지는데 본 연구에서 사용한 용접기의 경우 대략 $K_V = 0.7, K_I = 0.3$ 으로 얻어졌고 이는 실험적으로 구하였다. 이 값의 비는 용접기 유형에 따라 달라지며 K_I 가 클수록 정전류특성에 가까워진다.

3. 인버터 아크용접시스템 설계

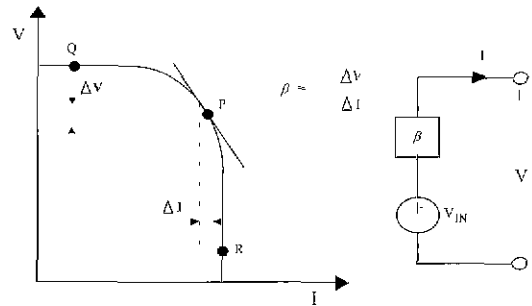
본 연구에서 대상으로 한 피복아크에 적용하는 PWM 컨버터-인버터 용접시스템의 주요 요구정격은 표1와 같이 정하였다. PWM 컨버터의 스위칭주파수 f_c 는 낮은 전류정격의 스위칭 소자를 적용하기 위해서 10[kHz]로 설정하였으며, PWM 인버터의 스위칭주파수 f_i 는 인버터의 고주파변압기와 출력단 리액터의 크



(a) 인버터 용접기의 등가회로



(b) 제안된 제어블럭선도



(c) 용접 전원의 V-I 특성

그림 2 인버터 아크용접기의 등가회로 및 V-I 특성
Fig. 2 Equivalent circuit and V-I characteristic of inverter welding machine.

기를 줄이기 위하여 16[kHz]로 설정하였다.

인버터 아크 용접시스템의 설계는 PWM 컨버터부의 교류인덕턴스 L_S 와 직류커패시턴스 C_{DC} 의 선정이 필요하고, 또한 PWM인버터부에는 고주파변압기, 블록킹커패시턴스 C_B , 직류리액턴스 L_{DC} 의 선정이 필요하다. 따라서 표2에 이들의 값을 선정하는 설계기준값과 시뮬레이션 및 실험에 의해 최종선정값을 제시하였다.

3.1 시스템정수 선정

3.1.1 교류인덕턴스 L_s

인덕터 L_s 에 흐르는 전류는 스위칭에 의해 맥동을 갖는 정현파 전류형태로 흐르게 된다. 이때 전류의 상승 및 하강 기울기를 결정짓는 인덕턴스 선정은 다음과 같이 된다. Δi 를 교류측전류의 맥동성분에 대한 peak-to-peak값이라고 하면 교류인덕턴스는 다음으로 구해진다.

$$L_s = \frac{\sqrt{2} V_s - V_C}{\Delta i} \cdot \frac{1}{2f_c} \quad (9)$$

여기서, f_c 는 PWM컨버터의 스위칭 주파수임.

3.1.2 직류링크 커패시턴스 C_{DC}

직류커패시턴스는 정상상태에 대한 순시 입력전력의 소신호해석(small signal analysis)으로부터 얻어지는데, 그 결과를 나타내면 다음과 같다.

$$C_{DC} = \frac{V_s \cdot I_s}{2\pi f_s \cdot V_C \cdot \Delta V_C} \quad (10)$$

여기서, V_C 는 직류링크 전압, ΔV_C 는 직류측 맥동전압임.

3.1.3 블로킹(blocking) 커패시턴스 C_B

인버터출력에는 직류성분이 존재할 수 있고 그 직류로 인해 변압기가 포화되면서 큰 전류가 흘러 소자가 파괴된다. 이를 막기 위해 인버터와 고주파 변압기 사이에 직렬로 삽입되는 블로킹 커패시터 때문에 오히려 출력전압의 유효치가 저하되는 단점도 있다. 따라서 용접전원에서는 일반적으로 최대 듀티에서 10%정도의 전압강하를 허용하도록 선정되며 권선비 a , 출력전류를 고려한 C_B 는 다음과 같다.

$$C_B = \frac{I_{WEL}}{a \cdot \Delta V_{Cb} \cdot f_I} \quad (11)$$

여기서, ΔV_{Cb} 는 블로킹 커패시터에 걸리는 최대 맥동전압임.

3.1.4 고주파 변압기

용접용 변압기는 정전류특성 즉 수하특성을 갖는다. 이를 위해 공극을 갖는 누설변압기의 구조로 하지만 인버터용접용 고주파변압기의 경우 수하특성 등을 인

버터의 제어에 의해 구현한다. 따라서 공극을 갖지 않는 변압기로 하고 인버터의 출력전압에 대해 원하는 2차측 전압이 얻어지도록 하는 변압비만 결정하면 된다. 즉 직류단 전압 V_C 와 인버터의 무부하 출력전압 V_{OPEN} 에 의한 권선비는 다음과 같다.

$$a = \frac{V_C}{V_{OPEN}} \quad (12)$$

3.1.5 직류리액터 L_{DC}

직류리액터는 용접중 아크전류를 안정하게 해 주는 역할을 하는데, 문헌^[7]에 의하면 직류 리액턴스가 커질수록 스펙터의 발생량은 줄어들지만 반면에 아크의 기동성이 저하되고 만약 L_{DC} 가 너무 커지게 되면 아크의 발생이 어려워진다. 따라서 적절한 선정이 필요하다. 해석적으로는 용접부하를 일단 일정한 정격부하(등가저항 R)로 간주하여 L_{DC} 를 구한 후 실험적인 방법으로 그 값을 최적화해 나간다.

V_{OPEN} 을 출력단 무부하전압, V_{WEL} 및 I_{WEL} 을 정격 출력전압 또는 전류라고 할 때 해석적인 L_{dc} 즉 최대값은 다음과 같이 구해진다.

$$L_{dc} \leq \frac{-R \cdot t_R}{\ln(1 - \frac{I_{WEL}}{V_{OPEN}} \cdot R)} \quad (13)$$

여기서, 등가저항 $R = \frac{V_{OPEN} - V_{WEL}}{I_{WEL}}$ 이고, t_R 는 전류가 0에서 정격전류까지의 상승시간임.

표 1 인버터용접시스템의 요구정격
Table 1 Required specifications of inverter welding system

PWM 컨버터		PWM 인버터	
정격입력	$P_C = 6[\text{kW}]$	정격출력	$P_I = 6[\text{kW}]$
직류링크전압	$V_C = 350[\text{V}]$	직류링크전압	$V_C = 350[\text{V}]$
교류입력전압	$V_S = 220[\text{V}]$	정격출력전압	$V_{WEL} = 26[\text{V}]$
교류입력주파수	$f_S = 60[\text{Hz}]$	정격출력전류	$I_{WEL} = 150[\text{A}]$
전류 THD	$THD = 5[\%]$	무부하출력전압	$V_{OPEN} = 70[\text{V}]$
입력역률	$PF = 99[\%]$	DC 전압강하	$\Delta V_{Cb} = 0.1 V_C$
출력전압맥동율	$\Delta V_C = 0.02 V_C$	전류상승시간	$t_R = 1[\text{msec}]$
스위칭주파수	$f_c = 10[\text{kHz}]$	스위칭주파수	$f_I = 16[\text{kHz}]$

표 2 시스템의 요구정격에 대한 설계예시
Table 2 Design example of required system specifications.

항목	설계값	최종값
L_S	3[mH]	2.4[mH]
C_{DC}	5000[uF]	4000[uF]
전압제어기 K_{PVC}, K_{IVC}	2.0, 2.23	3, 1.11
전류제어기 K_{PIC}, K_{IIC}	90, 100	90, 100
C_B	50[uF]	50[uF]
a	5	5
L_{DC}	290[uH]	290[uH]
전압제어기 K_{PVI}, K_{IVI}	3.2, 0.1	3.2, 0.1
전류제어기 K_{PCI}, K_{ICI}	10.0, 1.0	10.0, 1.0
가중치 K_V, K_I	0.7, 0.3	0.7, 0.3

3.2 시스템제어부 설계

인버터용접시스템의 제어부는 PWM컨버터 및 PWM 인버터의 제어부로 구분된다.

3.2.1 컨버터제어부 [8]

PWM컨버터의 제어부는 전압제어부와 전류제어부로 구성되고 전압제어기 또는 전류제어기 모두 시스템의 가격이나 성능을 고려하여 PI제어기를 사용하였다

직류링크전압을 위한 제어기는 제2고조파(120[Hz]성분) 백등이 존재하므로 제어부에의 전달을 방지하기 위해 필터가 필요하다. 이러한 필터를 포함하여 시스템을 모델링해야하며 시스템 전달함수로부터 Ziegler-Nichols의 marginal-stability에 의해 비례이득 K_{PVC} 및 적분이득 K_{IVC} 를 각각 구할 수 있는데, 이들 값을 표2에 나타내었다.

PWM컨버터의 교류전류제어기는 1차(first order) 모델로 하였다. 그것은 필터를 사용하지 않음으로써 제어시 속응성을 개선하기 위함이다 따라서 동조법이 아닌 Ziegler-Nichols의 process reaction curve에 의한 설계법으로 제어기를 설계하였고 그때 비례이득 및 적분이득 K_{PVI}, K_{IVI} 를 각각 구할 수 있으며 이들 값을 표2에 제시하였다.

3.2.2 인버터제어부

인버터의 제어부 설계를 위해서는 그림 2(b)의 전압 및 전류 제어부의 이득을 선정하고 또한 제어기 출력

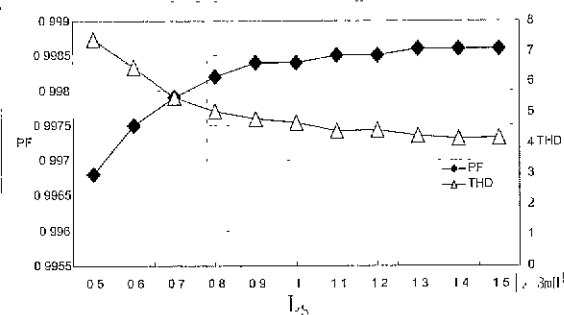
가중치 K_V, K_I 를 결정해야 한다. 우선 전압 및 전류 제어부를 설계하기 위해서 정격출력시의 부하를 증가 저항으로 놓고 제어기 이득을 선정한다. 또한 제어기 출력력을 위한 가중치는 용집출력의 지정된 운전범위의 양 극단에 대한 특성곡선의 각 기울기를 구하고 그 값을 토대로 K_V, K_I 를 설정한다.

3.3 해석 및 정수결정

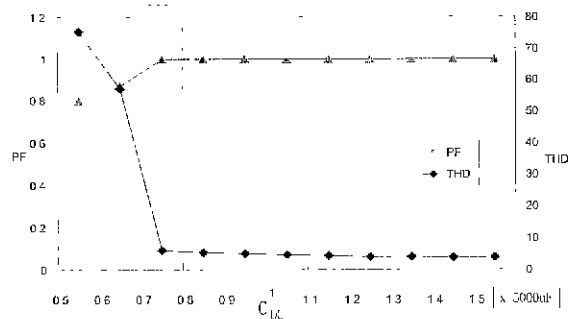
표1의 요구정격을 만족하는 시스템의 정수는 식(9)에서부터 식(13)까지 유도된 관계식을 사용하여 다음의 기준값을 얻을 수 있다.

$$L_S=3[mH], C_{DC}=5000[uF], C_B=50[uF], L_{DC}=290[uH]$$

이와 같이 얻어진 값들은 이론적으로 구해진 1차적인 값이므로 이를 기준으로 $\pm 50\%$ 의 범위로 변화시켜 가정 적절한 값으로 최종 선정한다.



(a) 인덕턴스 변화시



(b) 커패시턴스 변화시

그림 3 인덕턴스 및 커패시턴스에 대한 PF, THD의 변화
Fig. 3 Variations of PF, THD to inductance and capacitance

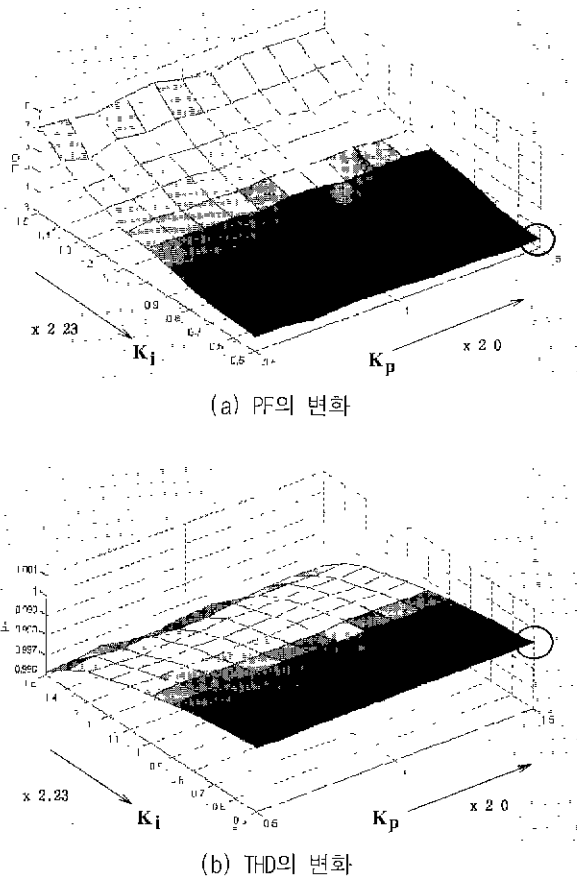


그림 4 K_p, K_i 에 대한 PF, THD의 변화
 Fig 4 Variations of PF and THD to K_p and K_i .

3.3.1 PWM 컨버터

식(9), 식(10)에 의해 얻어진 L_s, C_{DC} 의 값을 기준에 대해 $\pm 50\%$ 의 범위로 변화시켜 얻어진 전원측 역률(PF) 및 전류 THD의 결과는 그림3(a),(b)에 나타내었다. L_s 의 경우 기준값의 80% 즉, 대략 2.4[mH] 정도의 크기가 99%의 역률과 5%의 THD의 조건을 만족하는 최소값으로 되고 있다. 또한, C_{DC} 의 경우 기준값 5000[μ F]의 80%인 4000[μ F]으로 될 때 시스템의 역률 및 THD의 조건을 만족함을 알 수 있다.

또한, 전압제어기의 비례이득 K_{PVC} 과 적분이득 K_{IVC} 도 역률 및 THD에 영향을 주므로 이에 대한 관계특성은 그림4(a),(b)에 나타내었다. 비례이득과 적분이득에 대한 기준값(2.0, 2.23)에서 새로운 값(3.0, 1.11)으로 최종선택되었다. 그때의 역률 및 THD는 각각 99.9%, 3.5%로 얻어졌다.

이상의 결과로부터 역률은 제어기 이득의 변화는 시스템의 정수에 크게 영향을 받지 않으나 왜형률은 시

스템의 정수보다는 제어기 이득에 더욱 중속적으로 변화됨을 알 수 있었다.

3.3.2 PWM 인버터

블로킹커패시터 C_B , 변압비 a 및 L_{DC} 를 표 1의 사양을 만족하도록 표 2와 같이 설계예를 얻을 수가 있지만, 실제 적용에 있어서 블로킹 커패시터의 용량은 스위칭시의 듀티가 50% 이하로 인가 되므로 설계값 역시 50%를 적용하고 또한 직류리액터는 전술한 바와 같이 아크의 기능에 직접적인 영향을 주므로 설계치보다 작은 값을 적용하여야 하며 설계의 최종 결정에서는 실제 경험이 필요하다

4. 실험 및 결과

본 연구에서 대상으로 하는 입력전류제어형 인버터 아크 용접기에 대한 제반 특성을 기존의 AC 아크 용접기와 비교 검토하기 위하여 실험적으로 고찰하였다. 특성의 비교를 위해 역률, 효율, 입력특성등의 전기적 특성과 용접전압-전류의 변화, 스파터 및 사용률 등의 용접특성을 동시에 다루었고 전압제어, 전류제어 및 전력제어(혼용제어)의 다양한 기법에 대해 그 특성을 개별적으로 산출하였다.

특성비교를 위하여 용접의 출력전류를 100[A]와 150[A](정격전류)의 두가지 경우로 한정하여 실험을 수행하였다.

4.1 입력특성

그림5는 용접출력전류를 100[A]로 한 경우 AC 아크 용접기, 다이오드정류기-인버터아크용접기와 PWM컨버터-인버터 아크용접기에 대한 입력전압, 전류 및 출력전압, 전류의 파형이다. 그림(a)의 AC 아크용접기에서 입력전류가 변압기의 리액턴스 때문에 지연되고 있고 이로써 입력역률이 0.3~0.4로 저하되고 있다. 그림(b)는 다이오드정류기를 갖는 PWM인버터 아크용접시스템의 경우로 다이오드의 입력전류에 많은 고조파 성분이 포함되어 입력역률은 약0.6정도로 되었다. 그림(c)는 PWM컨버터를 갖는 PWM인버터 아크용접기의 경우로 전원전압에 대해 입력전류가 동상이면서 정현적으로 흐르고, 따라서 96%이상의 높은 역률을 가지고 있다.

이러한 입력 특성을 용접기의 유형별, 출력전류별로 구하였고 그림6에 비교하였다. 그림(a)는 용접기의 유형에 따른 역률로써 PWM컨버터를 갖는 PWM인버터

의 역률이 가장 최대로 개선됨을 확인할 수 있었다. 이러한 경향은 용접출력전류 100[A], 150[A]의 두 경우 모두 같이 나타나고 있다. 그림(b)는 100[A]의 용접 출력전류에 대해 각 용접기의 유입전력을 피상전력, 유효전력 및 무효전력에 대하여 분석하였다. 동일한 유효전력의 조건에서 AC 아크 용접기의 경우 9.1[kVA]의 피상전력이 입력되는 것에 반해 다이오드 정류기-인버터아크용접기의 피상전력은 4.2[kVA], 그리고 PWM컨버터-아크용접기의 피상전력이 3[kVA]로 측정되어 제안시스템이 다른 두 경우에 비하여 최대 70%정도의 피상전력이 감소되고 있다. 이는 PWM컨버터-PWM인버터 아크용접기를 사용함으로써 AC 아크용접기에 비해서는 약 30%, 다이오드정류기-PWM인버터 아크용접기에 비해서는 약 75%의 유효전력만을 공급하여도 동일한 용접출력을 얻을 수 있음을 의미한다.

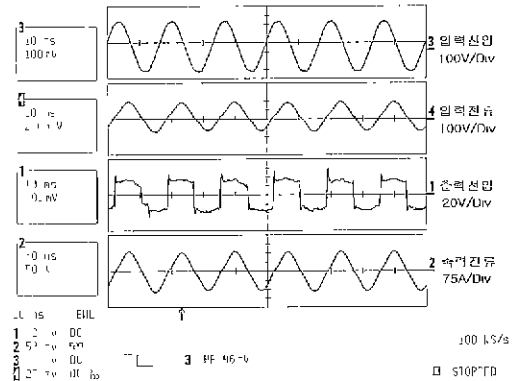
AC 용접기의 입력전류의 실효치는 제안된 시스템의 실효치에 비해 약 $\sqrt{3}$ 정도로 되고 동일한 회로조건시 손실은 3배이상으로 증대되고 특히, 변압기를 사용하는 AC 용접기의 경우 철심의 체적과 철손 등이 커지는 문제를 초래한다. 그리고 다이오드 정류기를 갖는 인버터용접기의 입력전류와 비교하면 입력전류의 실효치가 약 18%정도 감소된다.

4.2 출력특성

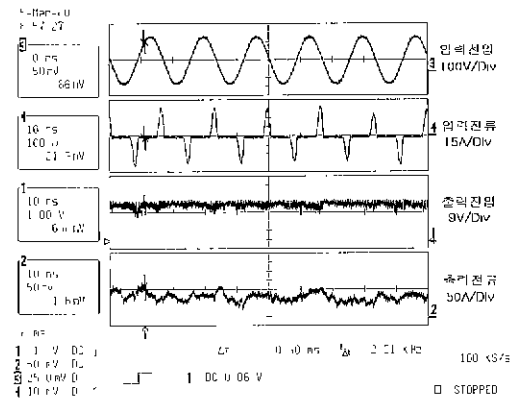
그림7은 3가지 유형의 용접기 출력전압 및 전류에 대한 파형을 나타내고 있으며 그중 그림(a)는 AC 아크용접기의 100[A] 출력전류에 대한 용접전압 및 전류이다. 변압기의 수하특성 때문에 출력전압이 클램핑되어 구형파형태로 출력되고 있다. 또한 출력용접전압이 60Hz로 교번되고 출력전류 또한 교번되므로 피복아크 용접기의 금속이행과정중 순간적인 아크의 차단이 발생되어 용접의 안정성이 저하된다.

위와 같은 출력전류조건에서 PWM인버터 아크용접기의 제어방식에 따른 출력전압 및 전류파형은 그림 7(b)~(d)에 나타내었다. 그림(b)는 정전압제어로 의한 결과로, 출력전압이 제어되어 일정하게 유지되나 출력전류는 별도로 제어하지 않기 때문에 전류변동이 비교적 크고 출력전류 피크치 또한 변하고 있다. 실제 용접시 아크의 소멸이 잦은 등 용접성능이 크게 저하되었다. 그림(c)는 정전류제어에 대한 결과로 출력전류를 직접 제어하기 때문에 비교적 일정하게 전류가 유지되고 있고 실제 용접시 우수한 용접성능을 발휘하였다. 그러나, 전압을 제어하지 않음에 따라 결과에서 보는

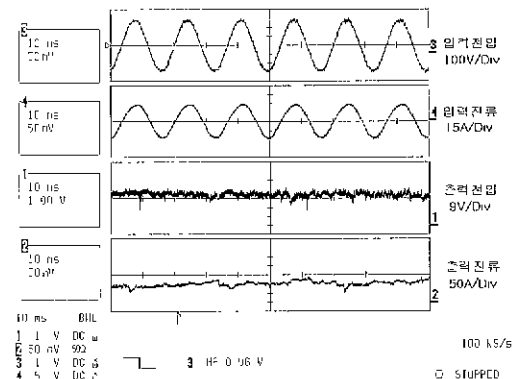
바와 같이 순간단락이 많이 존재하고, 또한 출력전압의 변동폭도 커지고 있다.



(a) AC 아크 용접의 파형

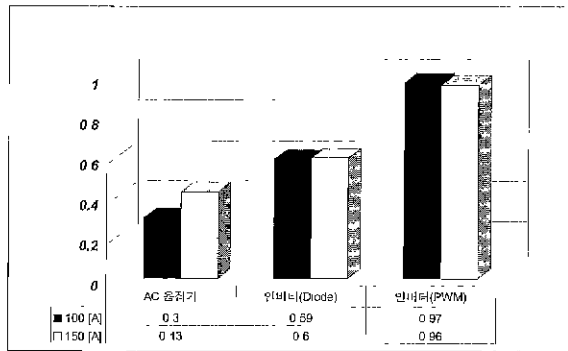


(b) 다이오드정류기-인버터 아크 용접의 파형

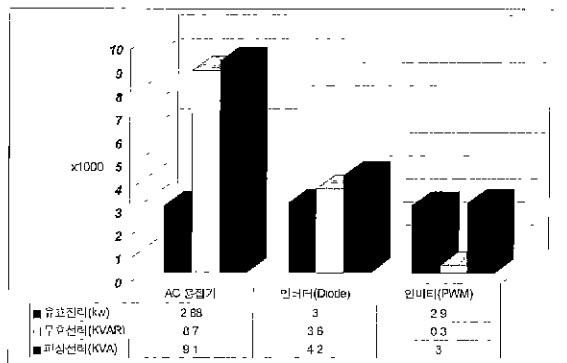


(c) PWM컨버터-인버터 아크 용접의 파형

그림 5 용접기 유형기 따른 입력 및 출력파형
Fig. 5 Input and output waveforms of several welding machines. (10[msec/div])



(a) 입력역율



(b) 입력전력(100A일 경우)

그림 6 아크 용접기의 입력역율 및 전력특성
Fig 6 characteristics of input power factor and power in several arc welding machines.

그림7(d)는 전압제어 및 전류제어를 동시에 수행하는 혼용제어에 의한 결과파형으로써 다른 두 방식과 비교해 보면 출력전압이 보다 더 일정하게 제어되면서 출력전류 또한 안정하게 제어되었다. 정전류제어에 비해 다소 전류의 맥동이 커지는 경향이 있으나 정전압제어에 비해서는 전류의 변동폭이 크게 개선되었고 실제 용접시 가장 우수한 용접성능을 발휘하였다. 더구나 피복아크용접의 금속이행과정은 스프레이이행(Spray metal transfer)으로 이루어지므로 전압과 전류의 변동을 줄일수록 아크의 안정성을 도모할 수 있고, 따라서 혼용제어방식이 용접성능의 관점에서 가장 유리하다고 하겠다.

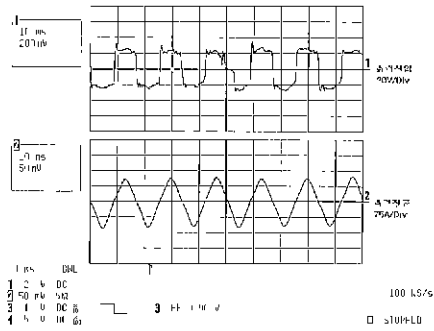
PWM인버터에 의한 용접성능분석을 위하여 실제 용접전압과 전류의 순시값 각 50,000개를 이용하여 전압-전류관계를 그림8과 같이 구하였다. V-I관계로부터 용접기에서 순간적인 금속이행과정의 규칙적 이행 여부를 예측할 수 있다.

피복아크의 스프레이이행에서는 용접시 일정전압-일정전류로 되어 V-I관계가 하나의 점으로 되면 가장 이상적이다. 그림8(a)는 AC 아크용접기에 대한 V-I관계로 출력전압 및 전류가 교류이므로 영점을 중심으로 점대칭형의 불규칙한 궤적을 보이고 있다. 더구나 입력전압의 크기가 0에서 최대치까지 교번되므로 전압 자체의 변동폭이 커서 규칙적인 금속이행을 기대할 수 없다. 그림8(b)~(d)는 PWM인버터용접기의 제어방식에 따른 전압-전류의 관계로 정전압제어의 그림(b)를 보면 정전압제어로 출력전압은 대체로 22[V]~30[V]이 내에서 변하여 심지어 정격치를 초과하는 등 그 변동이 심함을 알 수 있다.

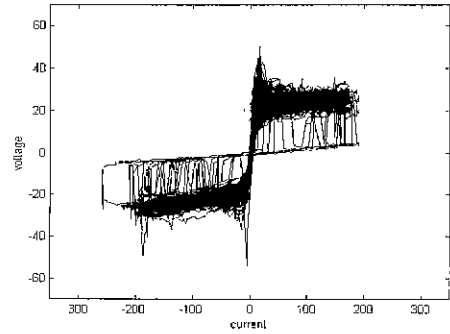
그림(c)의 정전류제어에서는 대체로 일정하게 전압과 전류가 제어되지만 순간단락이 많이 발생되어 출력전압이 단락전압(대체로 15[V]정도임)이하로 저하되기도 한다. 반면, 그림(d)의 혼용제어에서는 출력전압 및 전류의 변동이 다른 경우에 비해 비교적 하나의 지점근처 이내로 한정되고 있어 가장 원활한 용접이 수행되었다. 이상의 결과로부터 피복 아크용접기의 금속이행이 스프레이이행임을 고려하면 출력전압 및 전류의 변동이 가장 적은 혼용제어가 가장 유리한 제어방식임을 알 수 있다.

위의 순시값 50,000개를 토대로 안정전원의 공급성을 측정하기 위하여 전압 및 전류에 대한 변동을 분산(variance)으로 나타내 보았다. 여기서 분산값은 데이터의 평균값으로부터 이탈정도를 재규를 취하여 다시 평균값을 취한 것으로 정의하였다. 그림9는 100[A]의 용접전류에 대한 분산값으로 나타내고 있는데, 제안된 혼용제어의 전압분산이 약1.56로 가장 낮았고 전류분산은 전류제어의 경우가 244.97로 가장 낮게 나타났는데 이러한 것은 150[A]의 정격전류인 경우에도 유사한 경향을 가짐을 알 수 있었다. 종합적으로 전압 및 전류의 변동을 고려할 때 혼용제어가 가장 우수한 전압-전류의 순시특성을 가지는 것으로 판단되었다.

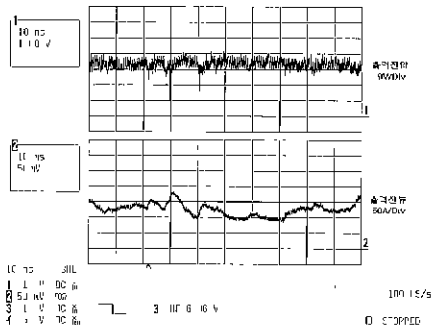
용접성능을 조사하기 위해 AC 아크용접기와 혼용제어에 대한 스패터발생량을 조사하였다. 동일한 용접조건을 설정하기 위하여 직경3.2[mm]의 피복아크용접봉 5개를 연속적으로 용접하여 발생하는 스패터를 구리상자내에서 포집하였다. 그림10은 발생된 스패터의 양을 나타내고 있으며 외관상 기존 AC 아크용접기의 스패터 발생량이 인버터아크용접기(혼용제어)에 비해 상당히 많음을 확인할 수 있다. 실제 측정한 스패터발생량은 각각 10.73[g]과 3.14[g]으로써 혼용제어에 의해 스패터를 약70%까지 감소시킬 수 있었다.



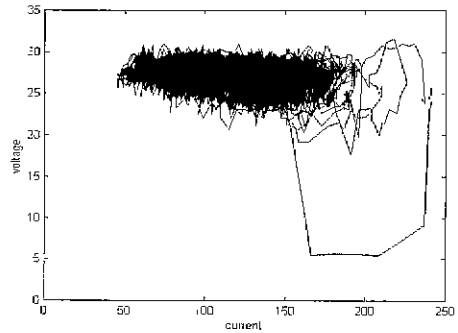
(a) AC 아크용접



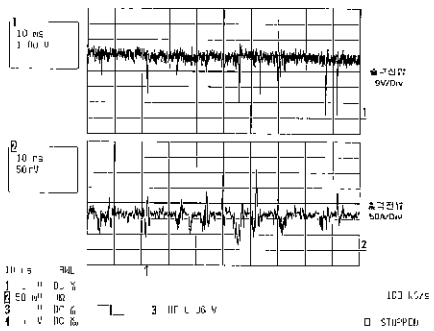
(a) AC 아크용접



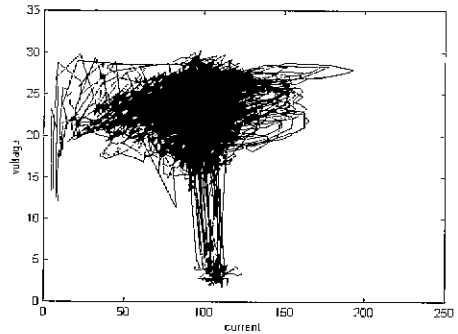
(b) 정전압제어의 인버터 아크용접



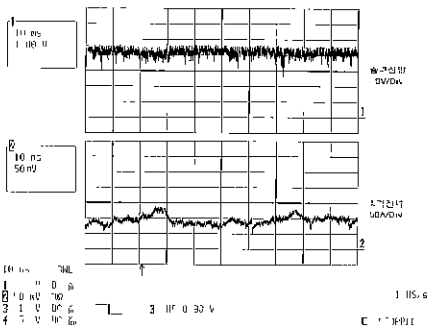
(b) 정전압제어의 인버터 아크용접



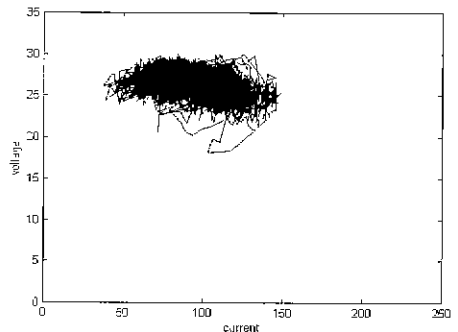
(c) 정전류제어의 인버터 아크용접



(c) 정전류제어의 인버터 아크용접



(d) 혼용제어의 인버터 아크용접



(d) 혼용제어의 인버터 아크용접

그림 7 용접제어방식에 따른 출력전압 및 전류파형
 Fig. 7 Output waveforms in different welding machines and control methods (10[msec/div])

그림 8 용접 V-I 파형
 Fig. 8 V-I trajectories in different welding machines and control methods.(1초 50,000개 데이터)

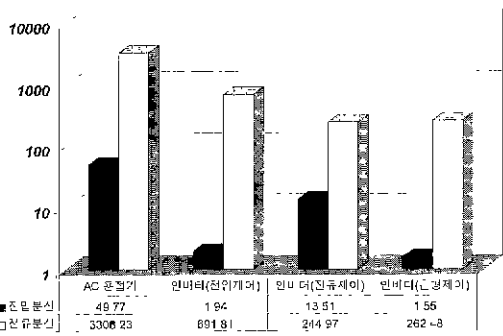
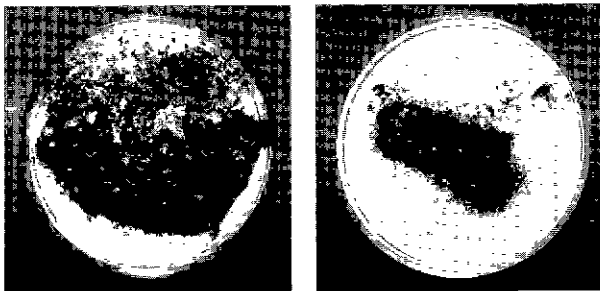


그림 9 용접제어방식에 따른 출력전압 및 전류의 분산 (100A 일경우)

Fig 9 Variance of voltage and current in different welding machines and control methods.



(a) AC 아크용접 (b) 혼형제어 인버터용접

그림 10 스패터 발생량

Fig 10 Generated spatters.

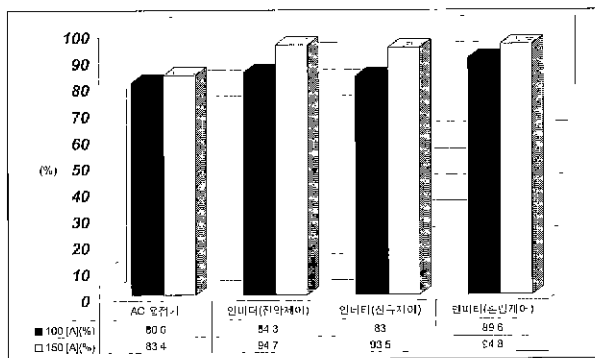


그림 11 용접제어방식에 따른 효율

Fig. 11 Efficiency in different welding machines and control methods.

이번에는 용접기 유형별 전기적 효율을 측정하였다. 그림11에 나타난 결과를 보면 100[A]의 출력전류조건에서 기존의 AC 용접기의 효율이 80.6%인데 반해 혼용제어의 효율이 89.6%로 크게 개선되고 있고 이러한 경향은 150[A]의 정격출력조건에서 그대로 나타나고

있다. 또한 150[A]의 정격출력조건에서는 전압제어, 전류제어에 의한 효율과 혼용제어에 의한 효율이 거의 유사해지고 있었다. 이는 제안하는 혼용제어가 중저부하에 두드러진 효율개선효과가 있음을 알 수 있다. 용접출력의 전체범위에서 기존 AC 용접기에 비해 효율이 크게 개선되고 있으며 더구나 AC 아크 용접기의 무부하시 번압기 1차 전류까지 고려하면 최소한 10% 이상의 효율상승효과를 기대할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 얇은 판형의 용접에 광범위하게 사용되는 피복 아크용접시스템의 성능개선을 위해 PWM컨버터를 적용한 PWM 인버터아크 용접시스템에 대하여 다루었다. 제안한 전체시스템에 대해 수식적 표현을 통해 해석적으로 설계치를 제시하였고 시뮬레이션을 통해 가장 최적값의 시스템 정수를 구하였다. 이러한 과정을 거쳐 설계된 PWM인버터 용접시스템을 전압, 전류 및 전력제어의 3가지 방식에 따라 이론적 및 실험적으로 비교·검토함으로써 제안 용접시스템에 가장 적합한 제어기법을 연구하였으며 실험결과 다음과 같은 특성을 얻을 수 있었다.

- (1) PWM 컨버터로써 입력역률을 0.99이상 유지
- (2) 제안된 혼용제어에 의해 스패터 지감효과
- (3) 고역률/고성능 인버터아크용접시스템을 구현

앞으로 스위칭 노이즈에 대한 제어부의 신뢰도 향상 연구, 그리고 CO₂아크 용접기 등 다른 유형의 용접기에의 적용 등의 향후 연구가 요망된다고 하겠다.

본 연구는 LG연암문화재단의 해외연구교수 연구비 지원에 의해 이루어 졌으며 이에 깊이 감사드립니다.

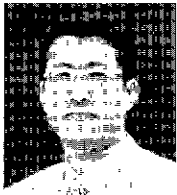
또한 이 연구가 이루어 질 수 있도록 1년간 체제를 허락하고 여로모로 도와주신 버지니아텍 Fred C. Lee 교수에게도 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] "PWM Converter-Inverter Arc Welding Machine Using New Type N.C.T.," IEEE, PESC '98 Record, pp.1636, Fukuoka, Japan, June 1998.
- [2] "싱글칩 마이크로 프로세서 제어에 의한 인버터 아크 용접기 특성에 관한 연구". 전기학회 논문지, 제46권, 제10호, pp.1481, 10월, 1997

- [3] 인버터 제어방식의 전기용접기 개발에 관한 연구, 상공부, 1990.
- [4] K. S. Harn, "Characteristics of Inverter Type Arc Welding Power Source," J.Korea Welding Society, vol.11, no 2, pp 21-26, June 1993.
- [5] S. Liu and T. A. Siewert, "Metal transfer in gas metal arc welding", *Welding Journal*, vol.68, no.2, pp.52, 1989.
- [6] 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.
- [7] T.Mita, "Spatter reduction-power source considerations", *Japan Weld Soc.* vol.59, no.8, pp.12, 1999.
- [8] Ken Dutton and Steve Thompson, "The Art of control engineering". *Addison Wesley Longmann*, 1997

저 자 소 개



최규하(崔圭夏)

1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업.
 1980년 동 대학원 졸업(석사). 1986년 동 대학원 졸업(공학박). 1987년~1988년 미국 오레곤주립대 Post-Doc 1998~1999년 미국 버지니아주립대 교환방문교수. 1997~1998년 건국대학교 연구처장. 현재 건국대학교 전기공학과 교수 및 전력전자기술연구센터 소장 겸 학회 총무이사.