전력전자학술대회 논문집 1999. 7.21-24

CO_2 인버터 아크용접기의 송급속도 제어에 의한 용접성능향상에 관한 연구

김길남, 고재석, 채영민, 원충연*, 김규식**, 목형수, 최규하
건국대학교, *성균관대학교, **서울시립대학교

A Study on Welding Performance Improvement in CO_2 Inverter Arc Welding Machine by Constant Wire Feeding Rate Control

K,N Kim, J.S Gho, Y.M Chae, C.Y won, K.S Kim, H.S Mok, G.h Choe
Kon Kuk Univ. Sung Kyun Kwan Univ. Seoul City Univ.

Abstract

Generally the control method of wire feeding motor in welding machine has been used full-wave phase control method. The fire-angle control generates low frequency speed ripple, and it causes the output current ripple. So it results in the variation of welding condition and low welding performances such as spatter generation and bead state.

For the purpose of welding performances improvement by speed controller in wire feeding motor, in this paper the constant speed control method for welding machine is proposed. The proposed system is composed of speed control loop and current control loop. As a result of experiment by using proposed constant wire feed speed controller, the output voltage and current waveform and metal transfer are maintained stably. And moreover the number of instantaneous short circuit occurrence is reduced remarkably.

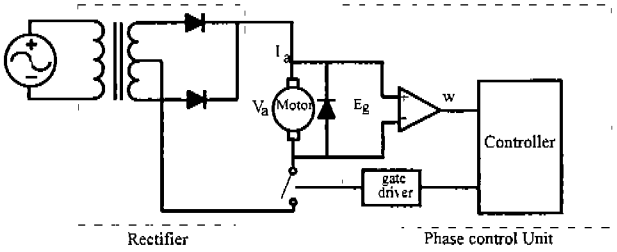
1. 서 론

일반적으로 국내산업현장에서 금속의 접합에 가장 광범위하게 사용되고 있는 GMAW (Gas Metal Arc Welding Machine)는 사용하는 차폐가스의 종류에 따라서 다양하게 구분되며, 이중에서 국내의 경우 차폐가스의 가격이 저렴한 CO_2 GMAW가 가장 많이 이용되고 있다. 이러한 CO_2 GMAW는 정전압특성을 출력하는 전력변환기기의 종류에 따라서 SCR제어형과 인버터 제어형 있는 CO_2 GMAW로 구분되며 최근에는 대용량 스위칭 소자의 가격저하에 따라 인버터 제어형 CO_2 GMAW가 주로 사용되고 있다.

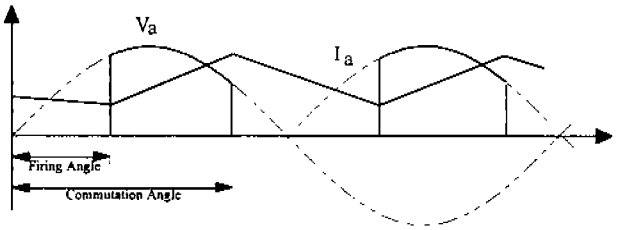
이러한 인버터 제어형 CO_2 GMAW의 경우 출력전압은 인버터 제어를 통하여 정전압 출력특성을 유지하고, 출력전류의 제어는 송급모터의 속도제어를 통하여 송급되는 와이어의 송급량으로 조절한다.

이러한 CO_2 GMAW에서 스패터 발생량 저감이나 비드상태 개선과 같은 용접성능을 향상시키기 위해서는 크게 인버터 제어를 통한 최적의 출력전압으로 제어하는 방식과 송급모터의 속도제어에 기인하는 출력전류파형제어를 기대할 수 있다.[1-4] 그러나 이상과 같은 용접기의 용접성능을 향상시키기 위한 다양한 최근의 연구동향은 주로 인버터의 고속 스위칭 동작을 통하여 순시적으로 출력전압 및 전류의 파형자체를 제어하는 연구가 주로 이루어지고 있다. 이상의 연구결과들은 기본적으로 송급모터의 송급속도가 일정하다는 가정하에서 이루어지고 있으나, 범용 용접기의 송급모터 속도방식은 일반적으로 그림1과 같은 전파 위상제어방식으로 속도제어를 수행한다. 이러한 제어방식은 송급모터의 역기전력을 검출하여 평균전압의 개념에서 SCR의 도통각을 제어하는 방식으로써 도통각에 따른 저주파 전류리플이 존재하고 토크나 속도에 영향을 주며, 저주파 스위칭으로 인한 송급모터의 속도 응답특성이 저하되고 모터자체의 속도리플이 존재한다는 단점이 있다.

더욱이 이러한 송급모터의 속도리플은 출력전류에 직접적인 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 송급모터의 제어부에 속도제어루프와 전류제어루프를 가지는 피드백 제어방식을 이용하여 송급모터의 정속도운전에 따른 용접성능 향상에 관하여 연구하였다. 또한 이상의 제안된 송급모터 제어방식에 따른 용접특성을 실험을 통하여 비교, 분석하였다.



(a) 제어회로도



(b) 공급전압과 리플전류

Fig. 1. 다이리스터를 이용한 전파위상제어기법

2. 인버터 제어형 CO_2 GMAW 구조

2-1. 전원부 구성

CO_2 GMAW의 구조는 그림2와 같다. 입력측의 다이오드 정류기와 커패시터를 거쳐 변환된 직류전압이 인버터와 변압기를 거쳐 교류로 변환되고 다시 정류기를 거쳐 DC 출력전압을 발생한다. 이러한 DC 출력전압은 송급모터에 의해 공급되는 와이어와 모재사이에 인가되고 인가된 전압에 의해 발생되는 아크열에 의해 송급되는 와이어와 모재가 용융되어 용접이 이루어지게 된다.

현재 사용되는 대부분의 인버터 용접기의 출력제어방식은 용접기의 출력전압을 정전압 특성을 갖도록 유지시키고, 용접기 출력전류는 송급모터의 속도제어를 통하여 제어하는 방식을 사용한다.

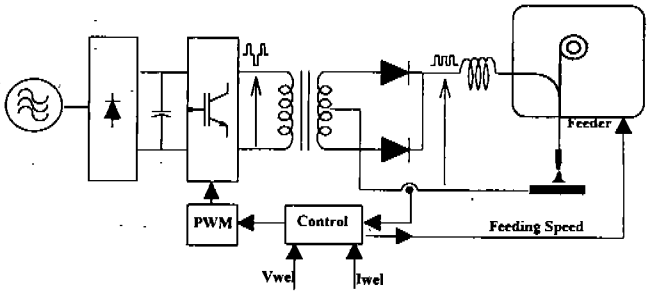


Fig. 2. CO_2 인버터 아크 용접기

2-2 용접기 출력전류와 송급모터의 관계

송급모터는 용접시 용가재로 사용되는 와이어를 공급하는 장치로써 속도를 가변함에 따라 송급속도가 조절되어 용접시 용융되는 와이어의 양이 변화되고 이에 따라서 출력전류의 크기가 결정된다. 따라서 이상의 송급속도와 출력전류와의 상관관계를 정량적으로 해석하기 위해서 에너지보존법칙을 이용하여 근사적으로 관계식을 유도할 수 있다.[5]

용접에 기여하는 열원은 에노드열원과 전기저항의 주울열이며, 수식의 간략화를 위하여 방사열과 스패터 발산에 따른 열에너지는 무시하고 아크의 길이, 용접모재의 이송속도등는 용접재료의 용융속도에 거의 영향을 주지 못하므로 제외하였다.

이상의 가정하에 에노드와 캐소드에서 발생한 열과 용적에서 소비하는 열이 열평형을 이룬다고 가정하면,

$$H_a + H_R = H_W + H_s \tag{1}$$

$$H_a(\text{에노드열원}) = (V_a + \varnothing + \frac{3}{2}\frac{kT}{e})I\triangle t \tag{2}$$

(V_a:에노드 전압강하, $\varnothing$:금속표면일함수, $\frac{3}{2}\frac{kT}{e}$:전자의 열에너지, I:용접전류)

$$H_R(\text{전극의 저항열}) = \frac{L}{\sigma S} I^2 \triangle t \tag{3}$$

(L:전극의 길이, σ:도전율, S:단면적)

$$H_W = m(H_m + H_l) \tag{4}$$

(H_W:전극용 금속의 용융열량+잠열, m:질량, H_m:1kg의 와이어를 용융점까지 올리는데 필요한 열, H_l:잠열)

$$H_s = m(T_d - T_m)C_p \tag{5}$$

(H_s: 평균온도 T_d로 전달되는 열에너지)

식(2)에서 식(5)를 식(1)에 대입하여 정리하면,

$$m/\triangle t = C_1 I + C_2 L I^2 [kg/\sec] \tag{6}$$

$$\left(C_1 = \frac{V_a + \varnothing + \frac{3}{2}\frac{kT}{e}}{H_m + H_l + C_p(T_d - T_m)}, \quad C_2 = \frac{\frac{1}{\sigma S}}{H_m + H_l + C_p(T_d - T_m)} \right)$$

식(6)으로부터 단위시간당 용융되는 와이어의 양을 표현할 수 있으며, 출력전류사이와는 2차 함수의 관계에 있음을 알 수 있고, 전극의 길이와는 선형적 비례관계가 있음을 알 수 있다.

와이어의 밀도를 ρ, 단면적을 S, 와이어 송급속도 ν, 시간을 $\triangle t$ 라하면 다음과 같이 질량 m을 와이어 송급속도 ν로 대신할 수 있다.

$$v = \frac{C_1}{\rho S} I + \frac{C_2}{\rho S} L I^2 [m/\sec] \quad (7)$$

위의 식에서 전극의 간격이 일정하다면 와이어의 송급속도와 용접전류와의 관계는 2차함수적으로 비례관계가 있음을 알 수 있고, 송급모터 속도제어를 통하여 일정한 출력전류를 기대 할 수 있다.

3. 제안한 송급모터 제어방식

일반적으로 용접기의 와이어 송급장치에는 영구자석형 DC모터를 사용한다. DC 모터는 기동특성이 좋고 선형시스템으로서 제어에 용이하다. 아래의 식은 영구 자석형 DC 모터의 방정식이다.[6-7]

$$L_a \frac{di_a}{dt} = Va - R_a I_a - E_g \quad (8)$$

$$J_a \frac{dw_a}{dt} = T_e - T_l - B_a w_a \quad (9)$$

$$E_g = K_e w_a \quad (10)$$

$$T_e = K_t I_a \quad (11)$$

(L_a: 전기자 인덕턴스, R_a: 전기자 저항, E_g: 역기전력, T_l : 부하토크, J_a : 회전자 관성, w_a: 회전자 각속도, K_e : 역기전력 상수(=Kt) K_t : 토크상수)

윗식에서 V_a와 i_a는 각각 인가 전압과 회전자전류이며, 식(8), (9)는 각각 전기방정식과 기계방정식이다. 식(10)에서 역기전력은 영구자석형 DC 모터의 경우에 회전자의 각속도에 비례하므로 이 역기전력을 피드백하여 속도제어를 하는데, 역기전력을 검출하는 방식은 모터 전원의 임피던스를 알고 있어야하며, 저속에서는 역기전력신호가 작으므로 노이즈에 민감하게 되어 측정이 용이하지 않는다는 단점이 있다.

이상과 같은 단점을 개선하기 위하여 본 논문에서는 역기전력 검출방식대신에 송급모터의 속도를 엔코더로 이용하여 직접측정하고 모터의 전류제어를 수행하는 제어방식을 사용하였다. 제안된 제어블럭선도는 그림3과 같이 속도제어루프와 전류제어루프로 구성되어 있다. 속도제어루프에서 사용되는 회전자의 속도는 모터와 연결된 엔코더에서 1회전당 512개의 펄스를 발생하고 F/V컨버터에서는 펄스를 전압신호로 바꾸어 준다. 엔코더 및 F/V컨버터를 통해 얻어진 속도신호는 용접전류 다이얼 전류지령신호로부터 입력되는 속도기준신호와 비교하여 전류제어기의 전류지령치를 만드는데 여기에 실제 용접전류를 저역통과 필터링하여 전류지령치에 전향(Feed-forward)시켜 모터에 흘려줄 최종 회전자 전류지령치를 생성한다. 모터의 회전자에 흐르는 전류를 검출하여 전류지령치와 비교된 출력이 오차증폭기를 거쳐서 회전자에 인가할 전압신호의 지령치가 만들어지고 이는 삼각파와 비교하여 MOSFET를 구동할 게이트 신호를 만들어 준다.

이러한 속도제어루프와 토크제어루프로 구성된 피드백 시스템으로 송급장치를 구성함으로 인해 실제 용접시 송급되는 와이어의 속도를 아크 반발력등의 왜란에 대해 일정하게 유지 할수 있고, 이를 통하여 용접성능 개선을 기대할 수 있다.

제안된 송급모터 구동회로는 그림4와 같이 전파정류기와 DC 링크 인덕터,평활용 콘덴서, DC 초퍼 및 제어부로 구성되어 있다. DC 모터의 경우 회전자의 인덕턴스가 매우 작기 때문에 원활한 전류제어를 위하여 L_c를 전류제어용 리액터로 사용하였다. 엔코더의 출력 A상은 F/V 컨버터의 입력으로 사용하였고, B상은 속도측정을 위하여 사용되었다. 속도측정은 80C196KC를 이용하여 펄스 수를 속도로 환산하여 LCD상에 디스플레이 할 수 있도록 구성하였다.

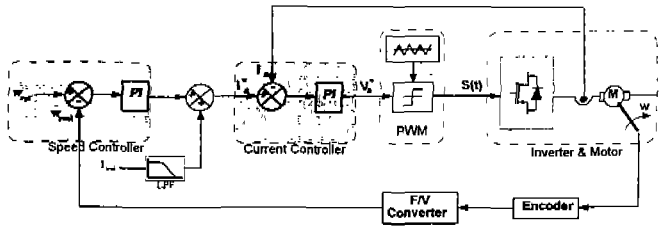


Fig. 3. 제안한 송급모터 제어 블럭다이어그램

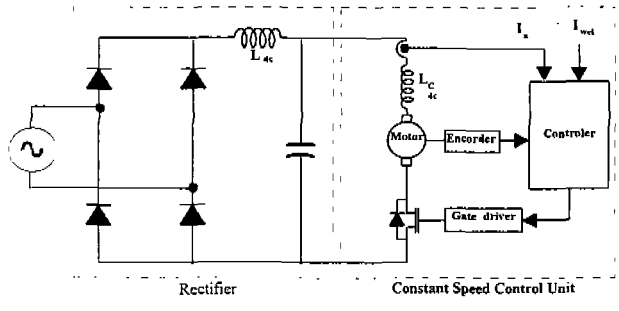


Fig. 4. 제안한 송급모터 제어회로도

4. 실험결과 및 검토

본 절에서는 제안된 송급모터 제어방식을 사용한 CO_2 GMAW의 용접성능평가를 위하여 전력제어부는 동일한 정전압 제어방식하에서 기존의 역기전력을 검출하고 SCR 도통각을 제어하는 송급모터 제어방식과 제안된 제어방식을 실제 실험을 통하여 비교, 분석하였다.

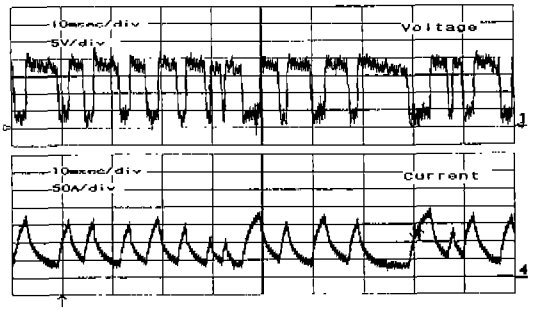
일반적으로 용접성능평가의 주요요소로는 실제출력전압 및 전류파형과 더불어 V-I곡선, 스패터발생량, 순간단락 횟수 및 비드상태등이 있으나, 본 논문에서는 출력파형과 V-I곡선 및 송급모터의 속도변동률의 관점에서 성능분석을 시도하였다. 본 실험에서의 용접조건으로는 용접기 출력전류를 각각 100[A]와 200[A]에서 실험을 수행하였다.

그림 5와 6은 각각 출력전류 100[A]와 200[A]인 경우의 출력전압 및 전류파형으로써 그림에서 알 수 있듯이 안정된 송급속도로 와이어가 공급되는 제안된 제어방식의 출력전류파형이 보다 규칙적으로 금속이행이 이루어지고 있음을 알 수 있고, 또한 출력전류가 증가됨에 따라서 출력파형상에서 순간단락현상이 나타남을 알 수 있고, 제안된 송급모터 제어방식을 사용한 출력전류파형이 기존의 출력전류파형에 비하여 피크치의 크기가 보다 균일하게 유지됨을 알 수 있다. 이는 금속이행과정이 기존의 방식에 비하여 보다 규칙적으로 이루어짐에 따라서 용적의 크기가 균일해지기 때문인 것으로 생각된다.

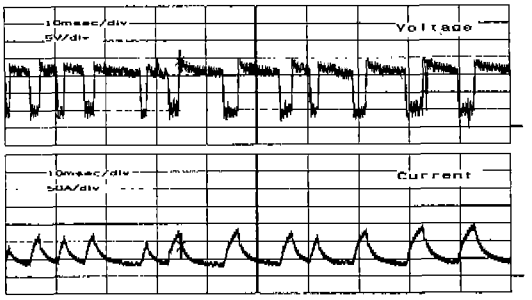
그림 7과 8은 각각 그림 5와 6의 조건에서 1초의 시간동안 출력전압 및 전류파형을 데이터 처리하여 얻은 출력전압 및 전류의 V-I곡선으로써 단락이행이 이루어지는 200[A]이하의 출력전류 조건하에서는 하나의 단락주기가 진행됨에 따라 궤적이 반시계방향으로 사각형을 이루게 된다. 일반적으로 순간단락현상이나 아크의 깨짐등과 같은 불규칙한 금속이행이 많이 존재할수록 궤적의 내부에 많은 선들이 나타나게 된다. 따라서 그림에서 알 수 있듯이 제안된 송급모터제어방식을 사용한 경우, 보다 안정된 금속이행이 이루어짐을 볼 수 있고, 안정된 단락이행이 이루어짐에 따라서 아크상태의 전류와 출력전류의 피크치의 크기도 일정해짐을 그림에서 확인할 수 있다.

그림 9와 10은 송급모터의 속도제어특성을 비교하기 위한 파형으로써 횡축은 송급모터의 속도이고 종축은 가속도이다. 따라서 만약 일정한 정속도로 송급모터가 제어된다면 가속도는 0으로 수렴할 것이고, 그림상에서 이는 한점으로 나타날 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 기존의 송급모터 제어방식의 경우 송급속도의 변동 혹은 속도리플이 많이 존재함에 따라 제안된 송급모터 제어방식에 비하여 큰 궤적을 보임을 알 수 있다.

특히 용접기 출력전류가 100[A]에서 200[A]로 증가함에 따라 송급모터의 속도가 증가함과 동시에 속도리플이 더욱 많이 존재하여, 송급모터 속도-가속도의 궤적의 크기가 더욱 커짐을 알 수 있고, 이를 통하여 대전류를 사용하는 입상이행영역인 300[A]이상의 용접조건에서 용접시에는 송급모터의 정속도제어가 더욱 필요할 것이라는 것을 알 수 있다.

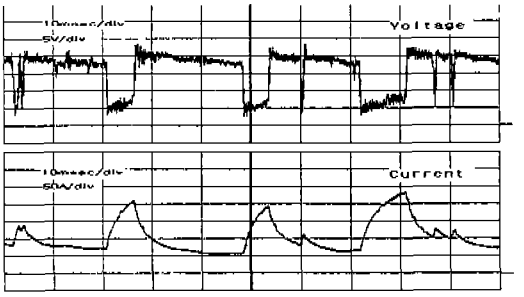


(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우

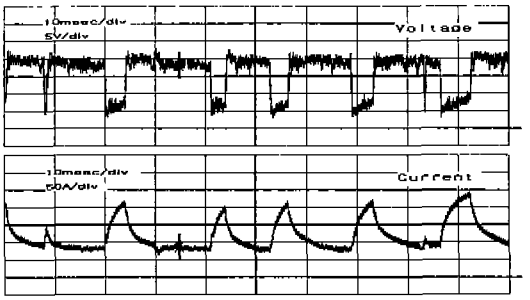


(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 5. 용접기 출력전압 및 전류파형 100[A]

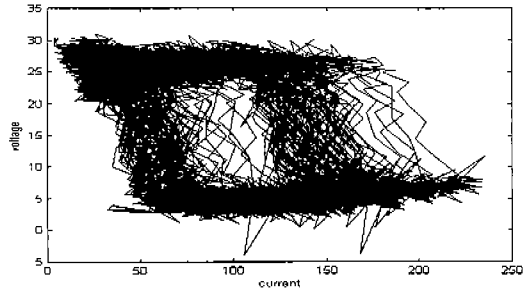


(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우

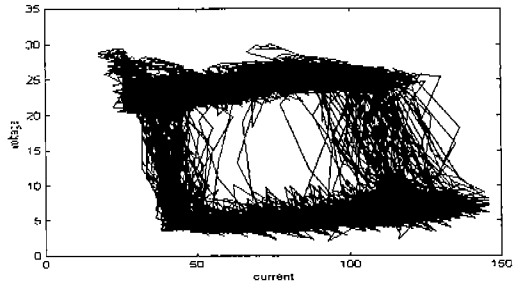


(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 6. 용접기 출력전압 및 전류파형 200[A]

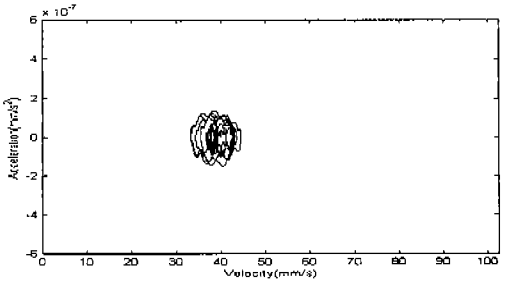


(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우

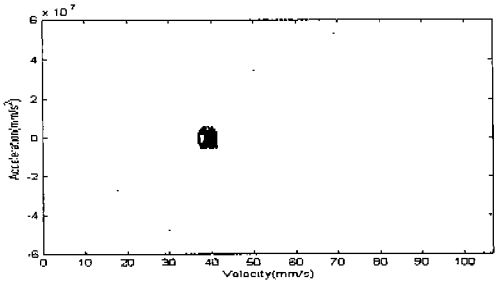


(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 7. 용접기 출력전압 및 전류의 V-I곡선 100[A]

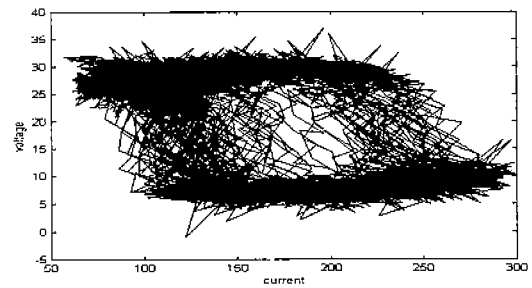


(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우

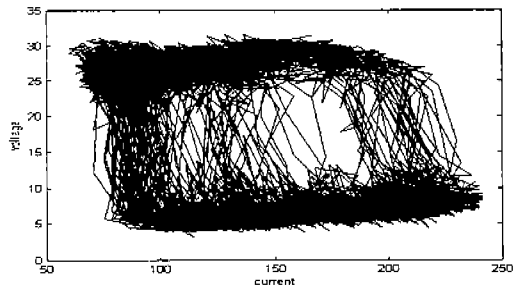


(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 9. 용접기 송급속도 및 가속도 곡선 100[A]

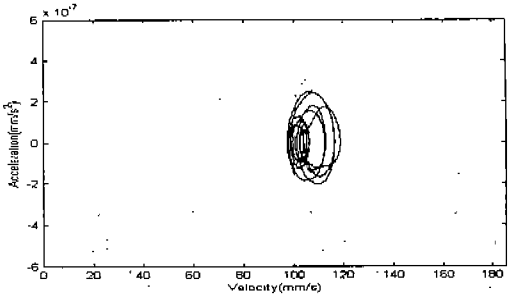


(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우

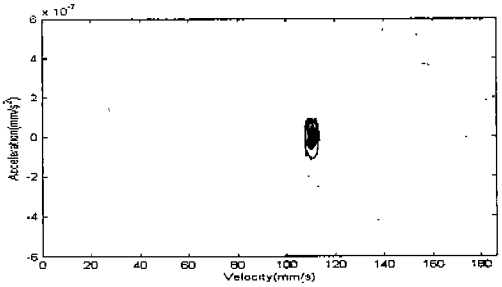


(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 8. 용접기 출력전압 및 전류의 V-I곡선 200[A]



(a) 기존의 송급모터 제어방식의 경우



(b) 제안된 송급모터 제어방식의 경우

Fig. 10. 용접기 송급속도 및 가속도 곡선 200[A]

5. 결 론

본 논문에서는 용접기의 출력전류를 결정하는 송급모터 속도제어를 통한 용접성능 향상에 관하여 연구하였다. 실험을 통하여 기존의 SCR 점호각 제어에 의한 송급속도 제어방식과 MOSFET를 이용한 초퍼회로를 사용하고 송급속도를 피드백루프로 사용하는 제안된 송급모터 제어방식을 용접성능의 측면에서 비교, 분석하였다. 실험결과 제안된 제어방식을 사용시 용접기 출력전압 및 전류파형의 V-I곡선과 단락 금속이행과정이 보다 안정화 됨을 알 수 있었고, 스패터 발생에 직접적인 영향을 미치는 순간단락의 회수의 측면에서도 개선을 기대할 수 있었다. 또한 송급모터의 속도와 가속도의 변동율을 통한 정속도 운전의 비교에서도 제안된 송급모터 방식이 일정한 속도출력특성을 가짐을 알 수 있었다.
향후 현재까지의 연구결과를 바탕으로 용접기 출력전류와 속도의 2차함수 관계를 이용한 시스템 모델링 및 제안된 제어방식을 대전류 영역으로 확대하여 전 전류영역에서의 용접성능 분석에 관한 연구를 지속하여야 할 것으로 사료된다.

본 연구는 1997년도 한국과학재단 특정기초 연구비 지원에 의하여 이루어 졌음.(No. 97-0101-0101-3)

참 고 문 헌

[1] Y.M. Chae et.al, "A Study on Welding Performance Improvement using Short-Circuit Metal Transfer on High-current CO_2 Arc Welding Machine", Power Electronics Annual Conference pp. 166-170, 1998

[2] H. Yamamoto "Recent advances in welding power systems for automated welding", Journal of Japan Weld Vol.64, pp. 457, 1995

[3] H. Yamamoto et,al. "The Development of Welding Current Control Systems for spatter reduction", *Welding International*, Vol.4 No.5, pp. 398-407, 1990

[4] T. Mita, "Reduction Spatter in CO_2 Gas- Shielded Arc Welding -Waveform Control", *Welding International*, Vol.3, pp. 227-232, 1989

[5] J. F. Lancaster "The Physics of welding", Pergamon Press 2nd ed., pp. 222, 1984

[6] J. Zubak et.al, "Pulsewidth Modulated Inverter Motor Drives with Improved Modulation", *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol.IA-11, pp.101-108, Nov./Dec. 1975.

[7] J.Holtz, "Pulsewidth Modulation - A Survey" , *IEEE PESC*, pp11-18, 1992.