

초정밀 직류 TIG 펄스 용접기

김동욱, 이영남, 김규식
서울시립대학교

High Precision Control of DC TIG Pulse Welders

Dong-uk Kim, Young-nam Lee, Gyu-sik Kim
University of Seoul

ABSTRACT

플랜트, 가스용기 등의 압력용기 제작 및 스텐레스, 알루미늄등의 특수금속용접에서 TIG 용접은 매우 중요한 기술적 위치를 차지하고 있다. 이런 용접에서 현재까지는 국내에서 노동 집약적인 수동 TIG 용접이 적용되고 있으나 인건비의 상승, 3D 산업으로 인한 숙련자의 부족으로 자동화가 급속히 추진되고 있다. 따라서 본 연구에서는 10A 이하에서도 용접이 가능한 극 정밀 직류 TIG 펄스 용접기에 관한 연구결과를 다룬다.

1. 서 론

플랜트의 배관, 압력용기 제작등의 기밀 용접이나 고강도를 요구하는 정밀용접을 위하여는 TIG용접이 필수적이다. 그러나 수동용접 와이어의 공급으로 인한 불균일한 용접품질 및 고기능 작업자가 요구되는 용접품질에 대해서는 취약한 특성을 가지고 있다. 이를 해결하기 위해서는 와이어 자동공급장치를 가진 TIG용접기의 개발이 필수적이다.

TIG용접기는 아크 용접기의 일종으로 비소모식 전극인 텅스텐 전극봉을 사용하는 불활성 가스 아크 용접이다. TIG용접은 1911년 고안된 이후 많은 발전을 거듭하고 있으며 현재 인버터를 이용하여 변환주파수 50[kHz]의 고속 IGBT 전력 변환(인버터 스위칭 방식)에 의한 변압기와 리액터의 초소형화로 기존에 비해 1/4정도의 소형 경량화가 가능하게 되었다. 또한 높은 사용률과 정전류 출력제어를 1초에 50,000번 조절하는 고속제어방식이므로 자동화 장비에 적당하다.

그림 1은 TIG용접의 구조를 나타낸다.

본 연구에서는 10A 이하에서도 용접이 가능한 극 정밀 직류 TIG 펄스 용접기에 관한 연구결과를 다룬다.

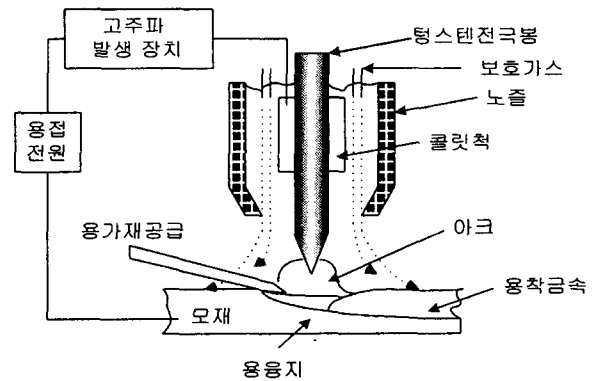


그림 1 TIG 용접
Fig. 1 TIG Welding

2. 펄스 용접에 의한 에너지 절감

절전형 용접기에 대한 연구에서 용접 전류로는 펄스직류전류를 사용하게 되는데, 이유는 펄스전류를 사용한 용접이 단락상태가 없고 스파터가 적으며 저전류를 사용할 수 있기 때문이다. 또한 비교적 굵은 직경의 와이어를 용융시키고 적은 아크(저전류)에서도 납작한 비드의 형성이 가능하기 때문이다. TIG용접에서 용접전류를 직류전류보다 펄스전류를 선택하는 주된 이유는 용접시 시료에의 열 입력측면에서 펄스전류가 직류전류에 비하여 열 입력이 더 적기 때문이다. 열 입력의 감소로 용접 왜곡, 그레인 크기, 용접 비드 폭 그리고 강화 현상이 줄어들고 동시에 침투(penetration)와 용융 효율은 증가하게 된다. 참고로 TIG용접의 품질에 영향을 미치는 대표적인 요소는 평균전류, 토치각도 그리고 차폐 가스의 유속에 의한 영향 등이 있다.

만약 텅스텐 전극근처의 전류 밀도가 모재사이의 전류밀도보다 높게 된다면 텅스텐 전극사이의 가스

압력은 모재의 가스압력보다 높게 된다. 이 가스압력차이는 TIG 용접에 있어서 텅스텐 전극에서 모재쪽으로 전자가 흐르는 것을 의미하며, 전자의 흐름에 따라 모재에 작용하는 힘(아크압력)이 높아져 전자의 속도가 빨라지게 되고 전자사이의 충돌속도가 높아져 모재에서 발생하는 열을 높게 된다. 아르곤 아크의 전형적인 특성 모델링을 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$v = B_1 i + B_2 + B_3 / i + B_4 L_a \quad (1)$$

여기서 v 는 아크 양단에서 측정된 전압[V]이고 i 는 아크 전류[A], $B_1 - B_4$ 는 차폐가스, 모재금속 재질, 텅스텐전극의 구조에 의해 결정되는 상수이다. L_a 는 모재와 텅스텐 전극사이의 간격[mm]이다. 식 (1)에서 $B_1 - B_4$ 는 주어진 실험 데이터로부터 최소 자승 평균법을 이용하여 구할 수 있다. 용접아크에 가해지는 평균 파워는 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) i(t) dt \quad (2)$$

식 (1)을 식 (2)에 대입하면 다음과 같다.

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T [B_1 i^2(t) + B_2 i(t) + B_3 + B_4 L_a i(t)] dt \quad (3)$$

펄스형태의 전류파형이 구형파를 갖는다면 평균파워는 다음과 같다.

$$P_p = B_1 [\delta (I_p)^2 + (1 - \delta) (I_b)^2] + (B_2 + B_4 L_a) [\delta I_p + (1 - \delta) I_b] + B_3 \quad (4)$$

여기서 P_p 는 펄스아크에 가해진 평균파워이다. 실효치전류는 다음과 같다.

$$I_{eff} = [\delta (I_p)^2 + (1 - \delta) (I_b)^2]^{1/2} \quad (5)$$

평균전류는 다음과 같다.

$$I_{avg} = \delta I_p + (1 - \delta) I_b \quad (6)$$

그러므로 펄스아크에 전달된 평균파워는 다음과 같이 실효치전류와 평균전류로 표현될 수 있다.

$$P_p = B_1 (I_{eff})^2 + (B_2 + B_4 L_a) I_{avg} + B_3 \quad (7)$$

일정한 전류의 펄스아크에 전달된 평균파워는 다음과 같다.

$$P_c = B_1 (I_c)^2 + (B_2 + B_4 L_a) I_c + B_3 \quad (8)$$

여기서 아래첨자 c 는 직류아크를 의미한다. 펄스아크와 직류아크가 동등한 입력파워를 갖는다고 하고 비교하는 것이 바람직하므로 식 (7)과 식 (8)을 같게 한다.

$$P_p = P_c \quad (9)$$

이로써, 펄스아크의 기저전류 I_b 와 피크전류 I_p , 그리고 직류아크 설정치 I_c 가 주어지면 피크전류 듀티비 δ 를 풀 수 있다.

$$\delta = \frac{B_1 [((I_c)^2 - (I_b)^2)] + (B_2 + B_4 L_a)(I_c - I_b)}{B_1 [((I_p)^2 - (I_b)^2)] + (B_2 + B_4 L_a)(I_p - I_b)} \quad (10)$$

한편 용접품질을 높이기 위한 그림 2와 같은 펄스 용접의 특성 및 용접적용에는 표 1과 같다. 표에서 보듯이 펄스용접의 장점은 단락상태가 없고 스패터가 적으며 저전류용접이 가능함에 있다. 또한 적은 아크(저전류)에서도 납작한 비드의 형성이 가능하다. 펄스전류의 조절을 위한 4가지 요소는 용접할 판의 두께에 따른 주파수, 아크의 입열량을 결정하는 기저전류 I_b , 피크전류 I_p , 그리고 피크전류 듀티비 δ 등이다.

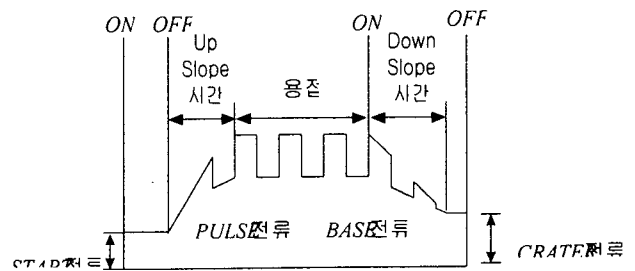






그림 2 크레이터 전류를 사용한 펄스 용접
Fig. 2 Pulse welding using Crater Current

표 1 펄스 용접 특성

Table 1 Characteristics of Pulse Welding

아크 종류	저주파 펄스	중주파 펄스
전류 파형	 (0.5~1.5Hz)	 (50~500Hz)
적용 용접	<ul style="list-style-type: none"> 후판 용접 전자세 용접 	<ul style="list-style-type: none"> 박판 고속 용접 육용접 용가봉 첨가
외관	<ul style="list-style-type: none"> 균일한 파형 비드 	<ul style="list-style-type: none"> 세밀하고 균일한 비드 

3. 시뮬레이션 및 실험

시뮬레이션 툴은 Matlab의 simulink, power blockset, fuzzy toolbox를 각각 사용하였고 각각의 세부적인 회로구성은 subsystem으로 구성하였다. 인버터 제어방식을 사용해서 출력전류의 순시적인 제어를 통한 아크 안정성을 향상시켰으며 2차측 다이오드 정류기 출력단에는 안정한 아크의 발생과 전류의 급격한 변화를 방지하기 위한 출력측 리액터를 직렬로 연결하였다. 전체적인 시뮬레이션 회로 구성은 그림 3과 같다.

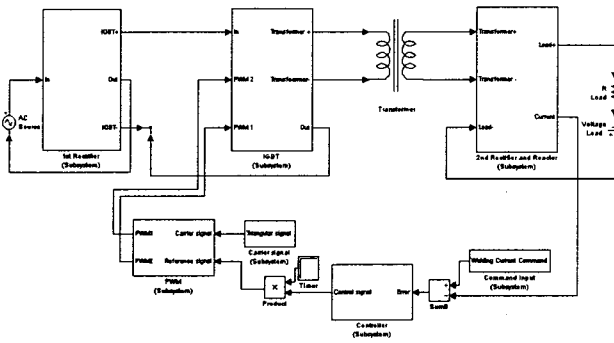


그림 3 TIG 용접 시스템의 전체 시뮬레이션 회로 구성

Fig. 3 Simulation of TIG Welding System

그림 4는 간단한 기준 전류 명령에 대한 PI 제어기를 사용할 때와 Hybrid 제어기를 사용할 때의 출력 전류 파형을 비교한 것이다. 여기서 초기 조건으로 입력 전압(input voltage)은 250[V] 스위칭 주파수(switching freq.)는 20[kHz]로 하였고 그림에서 작게나마 settling time의 개선 상태와 overshoot의 감소를 확인할 수 있다.

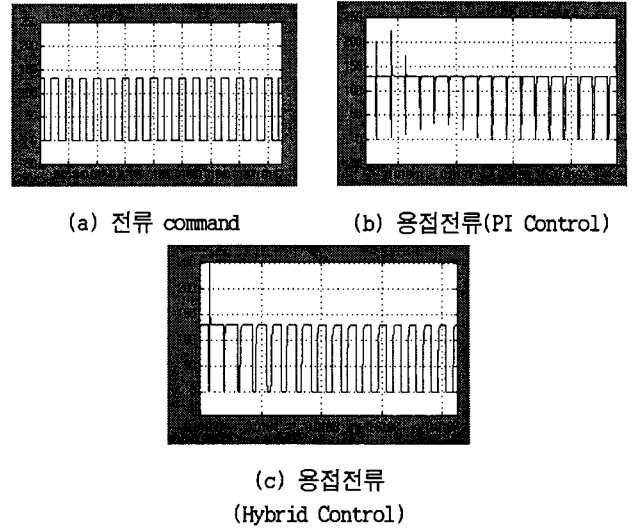


그림 4 TIG 용접기의 용접 전류 파형

Fig. 4 Welding Current Pulse Wave forms of TIG Welder

두 번째 시뮬레이션으로 에너지 절감을 위한 펄스 전류 파형을 얻는 과정을 수행하였다. 펄스 전류 파형은 피크 전류와 베이스 전류, 그리고 듀티비의 설정으로 만들어진다. 그림 5는 일반적인 펄스 전류 파형에서의 베이스 전류를 기준으로 얻게 되는 용접전류에 대해서, 이와 동일한 파워를 내기 위한 각 전류 형태별 입력 파워, 직류 전류, 그리고 펄스 전류의 듀티비를 보여주고 있다. 그림 5에서 용접 전류 방식은 직류전류('-')는 I_c , 펄스전류I('.')는 I_p 를 $2 \cdot I_b$ 로 듀티비(delta)는 0.5로 하였고 펄스 전류II('+')에서는 I_p 를 225로, I_b 를 25로 하였다. 결과를 분석해 보면 I_b 의 변화에 따라 I_c 와 delta가 가변 ($I_c=120[A]$, $\delta=0.275$)되고 동일 용접 전류 대 소모 전력비는 직류('-') > 펄스I('.') > 펄스II('+') 순으로 되며 소전류대에서 제안된 방식의 낮은 소모 전력 특성을 확인할 수 있다.

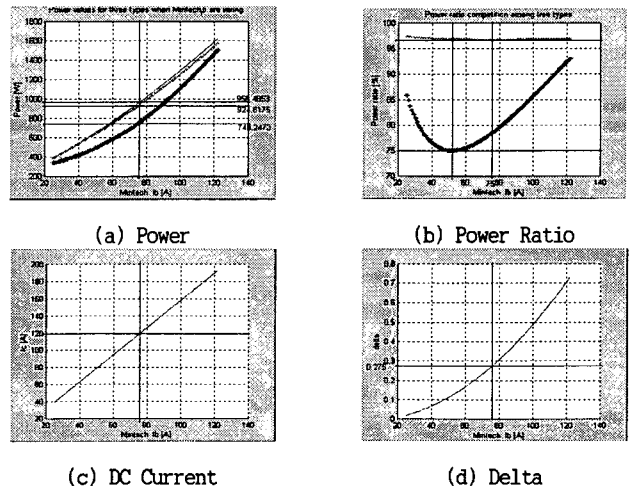


그림 5 에너지 절감을 위한 펄스 전류 파형의 파라미터

Fig. 5 Parameter of Pulse Current for Energy Reduction

마지막 시뮬레이션으로 그림 6에는 앞에서 얻어지는 전류 파형, 즉 에너지 절감을 위한 펄스 전류 파형의 베이스 전류, 피크 전류, 그리고 듀티비를 적용한 기준 펄스 전류 파형에 대해 시뮬레이터에 의해 출력되는 전류 파형을 보이고 있다. 여기서 초기 조건인 입력 전압은 250[V], 스위칭 주파수는 4[kHz], 샘플링시간(sampling time)은 5e-6[s]로 하였고 입력 파라미터는 앞선 시뮬레이션에서 얻어진 전류 파라미터인 I_b (base current)는 25[A], I_p (peak current)는 225[A], 그리고 delta(duty ratio)는 0.275를 사용하였다.

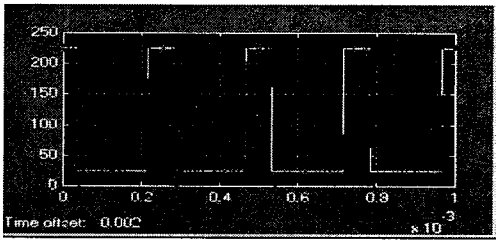


그림 6 기준 전류와 용접 전류
Fig. 6 Base Current and Welding Current

본 연구를 위한 실험 장치의 구성은 그림 7과 같다.

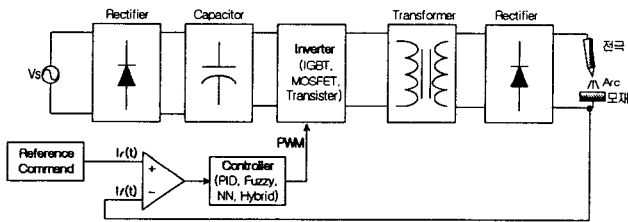
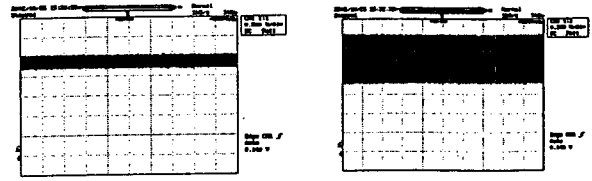


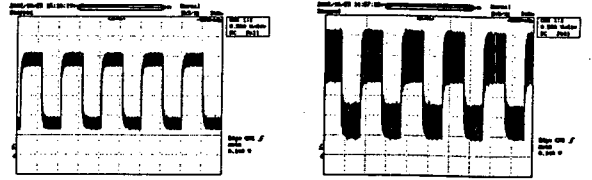
그림 7 PWM 제어를 포함한 인버터 TIG 용접기
Fig. 7 Inverter TIG Welder with PWM Controller

본 연구에서 적용하는 PWM 제어는 Hybrid 제어 방식으로 기존의 PID 제어기에 퍼지 추론 시스템(mamdani)을 접목해 비례 제어 게인에 곱해지는 성분을 고려함으로써 제어기 게인의 동적 변화를 구현하는 방식이다.

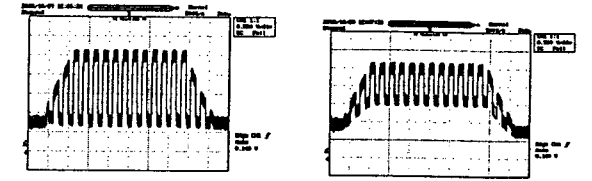
아래는 본 실험에서 직류용접전류와 펄스직류용접전류를 측정된 전류 파형이다. 그림 8 (a)는 30A의 직류 용접전류 파형이고 (b)는 이에 고주파를 첨가한 직류 용접전류 파형이다. (c)와 (d)는 펄스 용접전류 파형으로 (c)는 용접전류 30A, 베이스 전류 10A, 주파수 30Hz 그리고 펄스폭을 0.5로 세팅하여 측정된 결과이며, (d)는 이에 고주파를 첨가한 파형이다. (e)~(g)는 크레이터를 첨가한 펄스용접 파형으로 (c)와 같은 설정에 앞슬로프 시간을 2초, 다운슬로프 시간을 2초로 설정하였다. (e)는 베이스 전류를 용접시작전류와 같이 10A로 설정한 것이다.



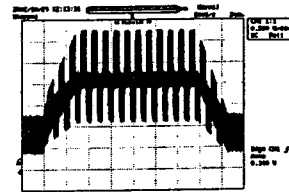
(a) 직류용접전류 (b) 고주파직류용접전류



(c) 펄스용접전류 (d) 고주파펄스용접전류



(e) 크레이터 첨가 (베이스 전류-10A) (f) 크레이터 첨가 (베이스 전류-20A)



(g) 크레이터를 첨가한 고주파펄스용접전류

그림 8 용접 전류 파형

Fig. 8 Wave Form of Welding Current

(f)는 베이스 전류를 20A로 설정하여 측정된 파형이며, (g)는 크레이터를 첨가한 펄스용접전류에 고주파를 포함시킨 파형이다.

4. 결론

용접전류를 펄스직류전류로 선택하면 전력의 소모가 줄고 용접시 단락상태가 없어지며 스파터가 적게되고 저전류 용접이 가능하며, 비교적 굵은 직경의 와이어를 용융시켜 적은 아크에서도 납작한 비드의 형성이 가능하게 된다.

펄스전류를 TIG 용접에 적용시키면 직류 TIG 용접에 비해 시료에의 열 입력이 감소하여 용접왜곡, 그레인 크기, 용접 비드 폭 그리고 강화현상을 줄여주고 동시에 침투와 용융 효율은 증가하게 된다. 이제 저전류인 10A 수준까지 용접할 수 있는 마이크로 TIG 고성능 용접기의 개발로 특수용접까지 가능하게 되었고 에너지 효율을 높이기 위한 최적 펄스용접을 실현하게 되었다.

본 연구의 결과로, 플랜트의 배관, 압력용기 제작 등의 기밀용접이나 고강도를 요구하는 정밀용접을 위하여 와이어 자동공급장치를 가진 TIG 용접기를 국산화하여 큰 수입대체 효과를 기대한다.

이 논문은 한국과학재단의 2001 산학협력연구 지원사업 (2001-30200-004-1) 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] G. E. Cook, "Modeling of electric welding arcs for adaptive feedback control," IEEE IAS 1983 Conf. Rec., pp. 1241-1244, 1983.
- [2] G. E. Cook and Hussam El-Eean E. H. Eassa, "The effect of high-frequency pulsing of a welding arc", IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. IA-21, No. 5, Sept/Oct, pp. 1294-1299, 1985.
- [3] G. Lothongkum, P. Chaumbai, P. Bhandhubanyong, "TIG pulse welding of 304L stainless steel in flat, vertical and overhead positions", Journal of Materials Processing Technology, pp.410-414, 1999
- [4] R. W. Richardson, D. A. Adneron, and D. F. Farson, "Coaxial arc weld pool viewing for process monitoring and control", Welding Journal, Vol. 63, No. 3, pp. 43-50, 1984.
- [5] Sanjay Jain, S. R. Gupta, "Influence of Pulse Parameters on TIG Arc Efficiency, Indian Welding Journal, pp. 41-45, October. 1997.
- [6] S. Marques, C. Cruz, F. Antunes, J. Farias, "Step down converter with current control for Welding Applications", IECON, pp. 676-681, 1997.
- [7] 서문준, 김규식, 원충연, 민명식, 최규하, 목형수, "인버터 TIG 용접기의 펄스전류 제어에 관한 연구", 전력전자학술대회 논문집, pp. 154-157, 1998.7.
- [8] 오우석, 김규식, 원충연, 최규하, 목형수, "인버터 TIG 용접기의 아크 스타트 방식에 관한 연구", 대한전기학회 전력전자연구회 논문집, pp.3-19~3-22, 1999.4.
- [9] 이정봉, "IGBT 인버터 TIG 용접기의 역률개선에 관한 연구", 성균관대학교 석사학위 논문, 1997.
- [10] 임용식, 김규식, 원충연, 최규하, 목형수, "직류고전압 아크 스타트방식의 펄스 인버터 TIG 용접기," 전력전자학회 논문지 제5권 3호, pp. 238-245, 2000.6.
- [11] 임용식, 김규식, 최규하, 목형수, 원충연, "지능제어 알고리즘을 통한 펄스 인버터 TIG 용접기의 성능 향상", 전력전자학술대회논문집. pp.556-559, 2000.7.