

60Hz용 변압기를 이용한 인버터 AC 스폿용접시스템의 용접시간 최소화

石鎮圭^{*}, 姜聖權^{**}, 宋雄俠^{***}, 魯義哲[†], 金仁東^{****}, 金興根[§], 全泰園^{§§}

Minimization of Welding Time for an AC Resistance Spot Welding System With 60Hz Transformer

Jin-Kyu Seok, Sung-Kwan Kang, Woong-Hyub Song, Eui-Cheol Nho, In-Dong Kim,
Heung-Geun Kim, and Tae-Won Chun

요 약

본 논문은 인버터 AC 스폿용접시스템의 용접시간을 최소화하기 위한 방법에 관한 것이다. 기존의 SCR 회로방식을 이용한 스폿용접시스템의 경우 제어속도가 느리고 전류제어가 정밀하지 않다. 따라서 최근에는 인버터를 이용한 용접시스템이 점차 증가하고 있다. 2차전지의 전극과 같은 박판을 용접해야 하는 경우에는 용접시간이 수 [ms] 정도로 짧아야 한다. 수 [ms] 정도로 용접시간을 최소화하면서 수 천 [A]에 달하는 대전류를 흘리기 위해서 일반적으로 수십개의 스위칭 소자들을 병렬로 연결하여 사용하기도 한다. 본 논문에서는 단지 4개의 IGBT로 구성된 인버터와 60[Hz] 변압기만으로 수 [ms] 대의 용접이 가능한 비용절감형 용접시스템을 제안하고 특성을 분석하였다. 그리고 실험을 통하여 타당성과 효용성을 입증하였다.

ABSTRACT

This paper deals with a method to minimize the welding time for an AC spot welding system. The spot welding system using a conventional SCR type circuit has a disadvantage of slow control speed and no precise current control. Therefore, recently, the using of inverter type welding system is increasing. Conventional welding machine adopts several tens of switching devices connected in parallel to obtain a huge current of several thousands ampere with a short welding time. This paper analyzed a welding system consisting with 4 IGBT switches for a full-bridge inverter and conventional 60 [Hz] transformer. The simulation and experimental results show the validity of the proposed method.

Key Words : Resistance spot welding , Micro spot welding

1. 서 론

스폿용접기는 기계적으로 가압된 용접모재에 전류를 흘릴 경우 접합부의 접촉저항이 발열하여 용융상태가 되는 현상을 이용하는 용접기이다. 스폿용접기는 타 용접기에 비해 작업속도가 빠르고, 용접봉과 같은 삽입금속이 필요 없어 재료가 절약되고 깨끗한 용접결과를 얻을 수 있다. 또한 작업자의 숙련이 필요 없고 용접모재의 변형이 적어 대량생산에 적합하다. 현재 용

[†]교신저자 : 정회원, 부경대 전기공학과 교수

E-mail : nhoec@pknu.ac.kr

^{*}정회원, 지필로스 기술연구소 연구원

^{**}정회원, 웰텍시스템 대표

^{***}정회원, 부경대 대학원 전기공학과 석사과정.

^{****}정회원, 부경대 전기공학과 교수

[§]정회원, 경북대 전자전기공학부 교수

^{§§}정회원, 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수

접수일자 : 2010. 2. 25

1차 심사 : 2010. 3. 15

심사완료 : 2010. 4. 25

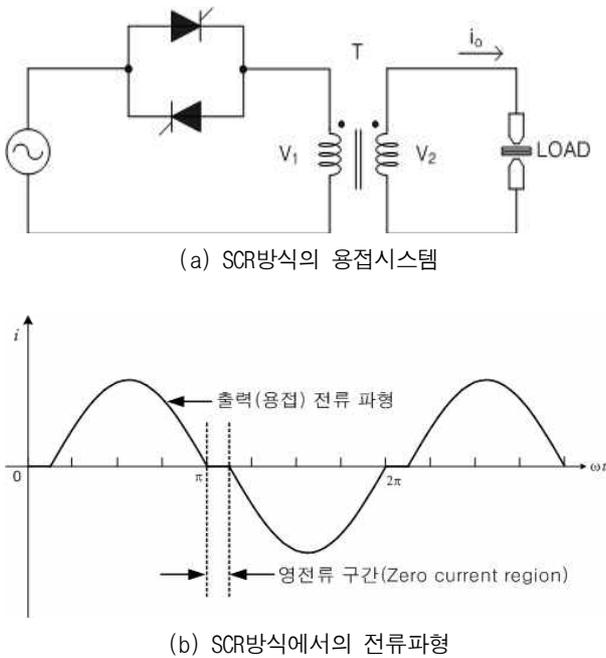


그림 1 SCR을 이용한 SPOT 용접 시스템과 전류파형
 Fig. 1 AC spot welding system using SCR and current waveform

접기는 자동차의 차체와 연료탱크, 냉장고와 세탁기의 몸체 뿐만 아니라 정밀 전자부품 등의 용접에 이용되고 있다. 용접기의 일반적인 형태는 그림 1(a)와 같은 SCR을 이용한 교류전류 출력방식이다.

그림 1의 SCR 방식은 상용 주파수의 전원을 용접 변압기에 의해, 저전압·대전류로 변환하기만 하면 되므로, 구조가 간단하여 값이 저렴한 것이 특징이다.^[1] 그림 1 (b)는 전형적인 SCR 방식의 출력전류를 나타낸다. SCR의 on/off 특성인 위상각 제어에 따라 출력을 제어하므로 출력전류의 극성이 바뀔 때 마다 영전류 구간이 발생한다. 이러한 영전류구간은 용접중에 쿨링 타임(Cooling time)으로 작용하여 안정된 용접결과를 얻기가 힘들다.^[2] 또한 SCR 기반의 용접기는 60 [Hz]의 상용전원을 그대로 사용하기 때문에 제어가 반주기(대략 8.3 [ms])마다 이루어지므로 전류제어를 고속으로 할 수가 없다.^[3] 일본용접협회(JWES)의 단상 AC 저항용접(SCR 기반의 용접) 표준조건 설정 지침에 의하면 표준전류를 "80% 날림이 발생되고, 20% 날림이 발생하지 않는 전류" 라고 정의를 내리고 있다.^[4]

이러한 문제들을 해결하기 위해서 MOSFET나 GTO와 같은 반도체 소자와 고주파 변압기 등을 이용한 연구가 진행되었고,^[5] 최근에는 IGBT 인버터를 사용한 시스템에 대한 연구개발이 활발히 이루어지고 있

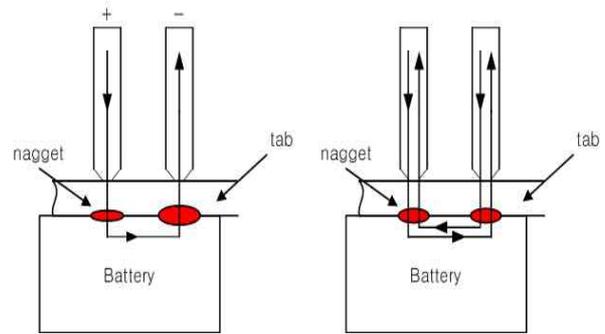


그림 2 시리즈 용접방법에서 직류 용접과 교류 용접 비교
 Fig. 2 Comparison between DC and AC welding in series welding method

으며, 실제 현장에 적용되는 단계에 있다. 인버터 AC 스폿용접시스템의 경우는 기존 SCR을 이용한 용접기보다 영전류 구간이 작다. 따라서 쿨링 타임이 작아지기 때문에 양호한 품질의 용접결과를 얻을 수 있다. IGBT 인버터 방식의 스폿용접기는 일반적으로 직류전류를 출력하는 제품이 대부분을 차지한다.

그러나 자동차 차체 조립 공정에서는 주로 교류를 사용한다.^[6] 특히 2차 전지의 상부전극 용접에 적용되는 시리즈 용접방법에서 직류전류를 사용하면 (+), (-) 극성에 따른 발열의 차이로 너깃이 비대칭으로 형성되어 접합부의 품질이 불안정해지고^[7], 전극의 편 마모가 발생한다. 이러한 현상은 (-)극에서는 발열량이 커서 너깃이 크게 생기지만 (+)극 쪽은 발열량이 적어 너깃이 상대적으로 작게 되어 비대칭의 너깃이 발생하기 때문이다. 교류식 스폿용접기를 사용하면 이러한 문제가 없어지고, 출력측에 정류다이오드가 필요 없기 때문에 직류식 스폿용접기보다 낮은 가격으로 제작할 수 있으며, 관리상의 용이성, 내구성 면에서도 우수하다고 할 수 있다. 그림 2는 시리즈 용접방법에서 직류용접과 교류용접을 나타낸 것이다.

그런데 이렇게 얇은 박판을 용접하는 마이크로 스폿용접의 경우 용접시간은 수 십 [ms]정도이며 수 [ms] 이내에 통전이 이루어진다. 용접시간이 이렇게 짧은 이유는 통전시간을 너무 길게 하면 열의 손실이 많아지는 것은 물론 불필요한 부분(주변부)을 가열하게 되고 모재가 부풀어 올라오며, 재질의 변화를 가져오게 되기 때문이다. 그런데 통전시간이 너무 짧으면 가열부가 작아지며, 국부에 한하여 용융되므로 충분한 용접이 되지 않는다. 따라서 산업현장에서 사용되는 용접기를 설계할 때 가장 중요시해야 할 것은 최대한 짧은 용접시간 내에 최대한의 용접전류를 흘려서 큰 열

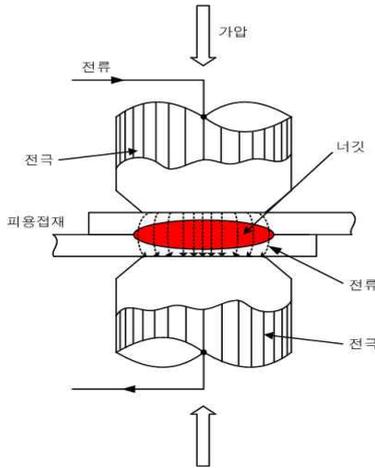


그림 3 저항용접의 원리
Fig. 3 Principle of ohmic welding

량을 용접모재의 용접부에 전달하는 것이다.

이러한 용접기를 구현하기 위하여 단상 인버터를 구성하는 수십개의 MOSFET를 병렬 접속하여 대전류 스위칭을 가능하게 하는 방식이 있으나, 이 방식은 사용소자 수가 너무 많아지고 손실 또한 커지며, 심지어 PCB 패턴 등의 영향을 받는 등 고려요소가 너무 많아지게 된다. 또한 사용소자 수가 많아짐에 따라 용접기를 기동할 때 개별 MOSFET의 과손여부를 체크해야 하는 등의 불편함이 있다. 따라서 단상인버터를 IGBT로 구성하고 인버터 출력에 60 [Hz] 강압용 대전류 변압기를 설치함으로써 IGBT의 스위칭 전류 크기를 수십 [A] 레벨로 낮추어 각각 하나의 IGBT로도 충분히 스위칭이 되는 시스템을 구현하였고 인버터 출력주파수를 증가시킴으로써 수 [ms]대로 용접시간을 최소화하는 기법을 제안하여 실험적으로 그 성능을 확인하였다.

2. 제안한 용접 시스템

2.1 저항용접의 원리

저항용접의 기본적인 원리는 그림 3과 같다.

피용접재(금속재료)의 저항값을 R 이라고 가정할 때, 이 피용접재에 전류 I 를 흘린다면, 이 피용접재에서 I^2R 의 전력이 소비되어 발열하고 온도가 상승한다. 손실이 없을 때 t 시간 동안 발생하는 열량은 다음과 같다.

$$Q = I^2 R t [J] \quad (1)$$

이때 I 는 용접(통전)전류, R 은 용접(통전)저항, t 는 용

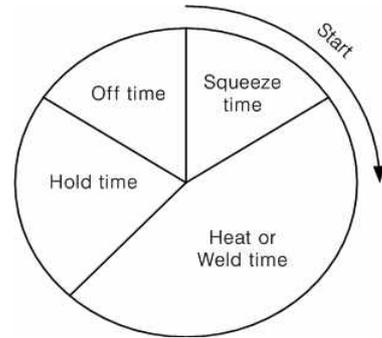


그림 4 저항스폿용접의 용접절차
Fig. 4 Spot welding time cycle

접(통전)시간이다. 그리고 R 은 다음과 같이 고유저항과 단면적, 길이, 전류밀도로 나타낼 수가 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A_s} = \rho \delta^2 L A_s [\Omega] \quad (2)$$

따라서 t 시간 동안에 피용접물에 I 만큼의 전류를 흘릴때 발생하는 열량은 다음 관계식과 같이 된다.

$$Q = I^2 R t = I^2 \rho \frac{L}{A_s} t = \rho \delta^2 L A_s t = \rho \delta^2 V t [J] \quad (3)$$

여기서 ρ 는 피용접재의 고유저항을 나타내며 피용접재의 전류가 흐르는 부분을 도체로 볼때, L 은 도체의 길이, A_s 는 도체의 단면적, V 는 도체의 체적, δ 는 전류밀도를 나타낸다. 용접에서 가장 중요한 것은 피용접재에 투입되는 열량(Q)인데, 위 식으로 보아 열량을 제어하기 위해서는 용접(통전)전류와 용접(통전)시간을 정밀하게 제어하는 것이 중요하다. 식 (3)에서 알 수 있듯이 열량은 전류의 제곱에 비례하고, 용접시간에 비례한다.^[8]

실제로 용접을 할 때에는 그림 4와 같이 Squeeze Time(초기 가압시간), Weld Time(통전시간), Hold Time(유지시간)을 확실히 구분하여 최상의 용접조건을 만족해야 한다. Squeeze Time은 피용접재가 가압되는 시간으로 이때 2개의 피용접재가 밀착한다. 이 Squeeze Time이 짧을 경우에는 밀착하기 전에 전류가 통전하여 용접 시 불꽃이 발생할 수 있으며, 특히 전력회로가 개방된 상태가 되어 무통전이 되는 경우도 발생할 수가 있다. Hold Time은 용접 후에 전극을 계속 가압하는 상태로 피용접재의 용융부가 응고하는데 필요한 시간이다. 그림 3에서 피용접재 사이에 너깃이

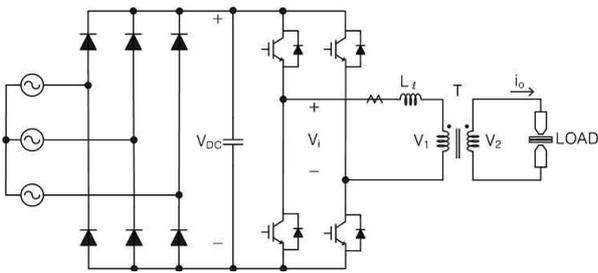


그림 5 제안한 SPOT 용접기 회로도
Fig. 5 Circuit diagram of the proposed SPOT welding machine

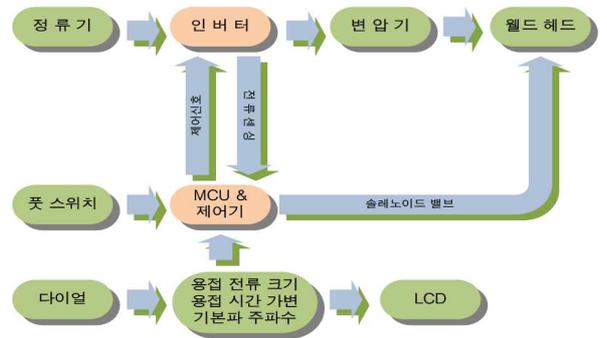


그림 6 제안한 방식의 시스템 블록다이어그램
Fig. 6 Block diagram of the proposed scheme

표 1 강압 변압기 사양
Table 1 Specification of down transformer

정격 1차측 전압	220 [V]
정격 1차측 전류	13.6 [A]
정격 2차측 전압	2 [V]
정격 2차측 전류	1500 [A]
정격 용량	3 [kVA]
정격 주파수	60 [Hz]
% Z	6.5

형성되는 것이 보인다. 너깃은 피용접재가 용접결과로 가압부위 내부에 생긴 용융된 피용접재가 응고한 것이며, 이 Hold Time을 제대로 확보해 주지 않을 때에는 너깃 형성이 제대로 되지 않아 용접품질에 악영향을 미치게 된다. 앞에서 설명했던 용접전류, 통전시간 뿐만 아니라 가압력을 통틀어 저항용접의 3대 요소라고 한다. 본 논문에서는 가압력을 제외한 용접전류와 통전시간에 대해 60 [Hz]용 변압기를 사용하였을 경우에 최대 용접전류와 최소의 용접시간을 구현하기 위한 연구를 하였다.

2.2 제안한 용접기의 전력회로도

그림 5는 제안한 용접기의 전력회로도를 나타낸다. 입력전원은 3상 220 [V]이고 이를 다이오드 전파정류기로 정류하여 직류 300 [V] 정도를 얻는다. 4개의 IGBT로 단상 풀브릿지 인버터를 구성하고 강압 변압기 2차측의 Welding gun을 통하여 각각의 전극에 접속된다. L_f 은 변압기 T의 누설인덕턴스를 의미하며, 강압변압기의 주요사양은 표 1과 같다.

강압 변압기는 일반적인 규소강판을 코어로 사용된 60 [Hz]용이다.

2.3 제안한 용접기의 동작 설명

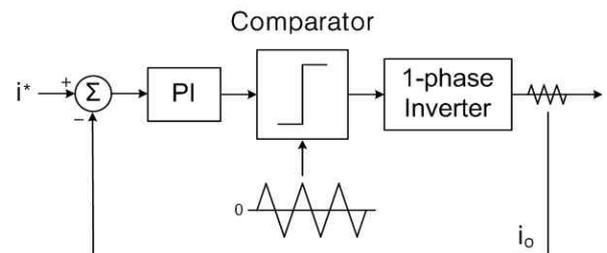


그림 7 고정주파수 가변듀티 제어
Fig. 7 Fixed frequency Variable duty control

그림 6은 제안한 용접기의 동작설명을 위한 블록다이어그램이다. 용접시퀀스는 기계 외함에 있는 블록다이어그램을 통해 용접전류의 크기와 용접시간, 그리고 기본파 주파수를 설정하고 LCD를 통하여 그 값을 확인하도록 하였다. 변수들을 설정한 후 용접사가 풋스위치를 밟으면 MCU는 명령을 인식하고, 공압으로 웰드 헤드를 닫히게 하여 피용접재가 밀착이 되도록 한다. 충분히 밀착이 된 상태에서 MCU는 정해진 Routine을 수행하기 시작한다.

그림 7은 용접기의 전류제어방식을 블록선도의 형태로 나타낸 그림이다. 전류명령치와 실제전류의 오차를 PI 제어기를 통해 증폭시켰고, PI 제어기의 출력은 고정주파수의 삼각파와 비교하여 스위칭 동작을 하게 하였다. 그림 7에서 삼각파의 주파수(스위칭 주파수)는 10 [kHz]로 설정하였고, IGBT 인버터 출력전압 V_i 의 기본파 주파수는 가변할 수 있도록 하였다.

실험에 사용된 DSP는 TI사의 TMX320F28335를 사용하였다. 이전의 제어용 DSP와는 달리 하드웨어적으로 32bit 크기의 부동 소숫점 연산이 가능하도록 설계가 되어있다. 따라서 소숫점 연산을 할 때에도 IQmath를 사용할 필요가 없으므로, 코딩이나 알고리즘 연산

표 2 시뮬레이션 파라미터
Table 2 Parameters for simulation

입력 전원	3상 220 [V], 60[Hz]
용접 전류	1500 [A]
스위칭 주파수	10 [kHz]
변압기 자화 인덕턴스	27 [mH]
변압기 누설 인덕턴스	2.84 [mH]
변압기 1차측 저항	40 [mΩ]
변압기 2차측 저항	16 [uΩ]

속도 측면에서 장점이 있다. 또한 정밀도가 12bit인 16 개 채널의 ADC모듈, 여러 종류의 통신모듈 등의 풍부한 주변회로가 탑재되어 있고 GPIO핀 또한 충분하여 향후 업그레이드를 해야 할 경우를 고려하여 선정하였다. 알고리즘 구현은 ePWM 모듈에서 Up-down count mode의 카운터 값들을 삼각파로 사용하고, math 헤더 파일에서 제공하는 sin함수를 이용하여 60 [Hz] ~ 1 [kHz]의 정현파를 만들어 open loop 연산이 가능하도록 하였다. 그리고 용접(통전)전류는 비교적 선형성이 높은 LEM사의 홀센서를 사용하여 적절한 크기의 전압원으로 변환하였다. 변환된 전압은 OP-AMP를 통해 ADC 모듈의 입력전압 범위에 맞도록 이득을 조정하고, 전압레벨을 조정하여 사용가능한 디지털 값으로 얻을 수 있게 하였고, 이 값을 이용하여 ePWM 인터럽트 서비스 루틴 안에서 PI제어를 통해 feed-back 연산을 수행하도록 구현하였다.

2.4 용접시간 미세조정 방법

앞에서 설명했듯이 얇은 박판을 용접하기 위해서 작은 전류로 오랜 시간 동안 용접을 하는 것은 용접부 이외에 주변부까지 불필요하게 가열하게 되므로 소재의 손상을 가져오므로 바람직하지 않은 방법이다. 따라서 바람직한 방법은 최대한 짧은 시간에 대전류를 통전시켜 용접을 하는 것이다. 인버터 출력전압의 기본파 주파수가 60 [Hz]라 할때, 한 주기는 16.67 [ms] 이므로 16.67 [ms] 이상의 용접시간이 필요한 경우는 60 [Hz] 정현파 전류의 수 사이클 이상을 용접시간으로 설정하면 된다. 그러나 16.67 [ms] 이하의 용접시간이 필요한 경우에는 기본파의 주파수가 60 [Hz] 보다 커야만 한다. 용접 최소시간 t_w 와 인버터 출력전압 기본파 f_1 사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

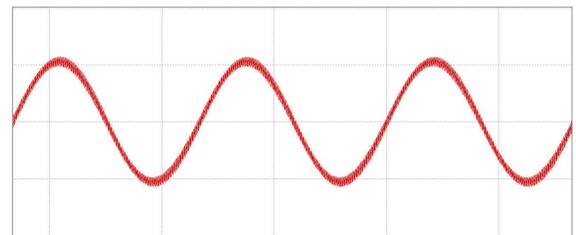
$$t_w = \frac{1}{f_1} [s] \tag{4}$$

예를 들어 최소 용접시간 t_w 을 2.5 [ms]로 정한다면, 인버터 출력전압의 기본파 f_1 은 200 [Hz]가 된다. 이때 고주파용 변압기를 사용하거나, MOSFET를 수십개 이상 병렬로 연결하여 변압기 없이 사용하는 방법이 있으나, 본 논문에서는 일반용 60 [Hz] 변압기를 사용하여 최소한의 비용으로 시스템구현이 가능하도록 하였다.

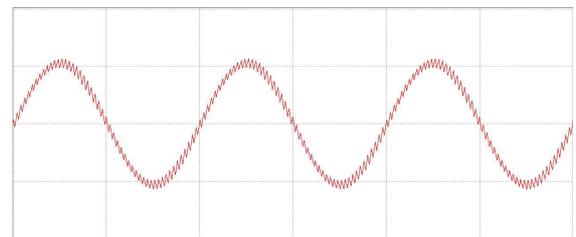
3. 시뮬레이션 결과

그림 5에 대하여 PSIM으로 시뮬레이션을 하였으며, 표 2는 시뮬레이션시 적용한 파라미터이다.

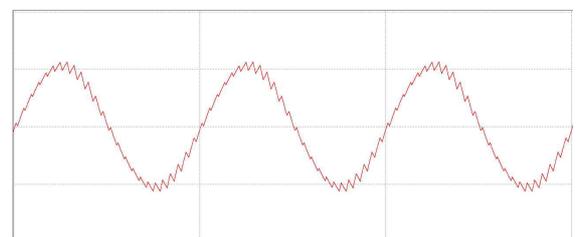
그림 8은 출력전류 크기를 시뮬레이션한 결과이다. 그림 8(a)는 인버터 출력전류의 기본파 수파수를 60 [Hz]로 한 경우이고 (b)~(f)는 각각 200, 400, 600, 800, 1000 [Hz]로 한 경우이다. 인버터 출력의 기본파 주파수를 400 [Hz]까지 증가시킬 때는 거의 정현파를 유지해 가면서 크기 감소도 발생하지 않으나, 600 [Hz] 이상에서는 파형이 왜곡되고 크기도 감소함을 알 수 있다. 이것은 변압기의 누설임피던스에 의한 전압 강하가 주된 이유이다.



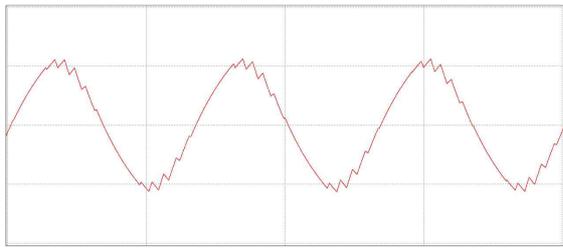
(a) 60 [Hz] (1000 [A]/div, 10 [ms]/div)



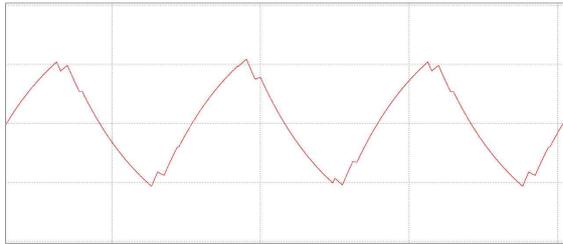
(b) 200 [Hz] (1000 [A]/div, 5 [ms]/div)



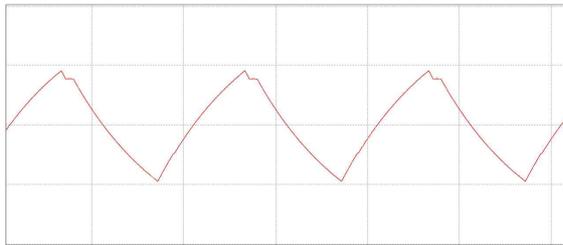
(c) 400 [Hz] (1000 [A]/div, 2 [ms]/div)



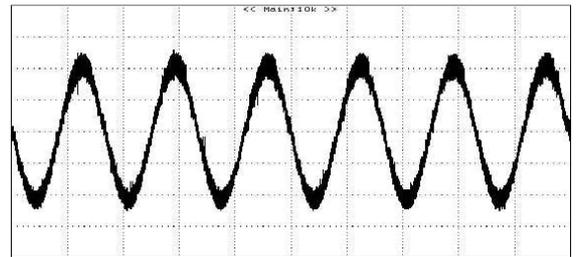
(d) 600 [Hz] (1000 [A]/div, 1 [ms]/div)



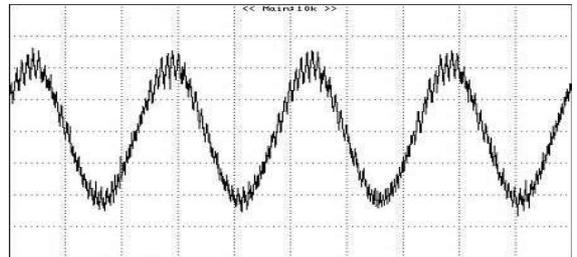
(e) 800 [Hz] (1000 [A]/div, 1 [ms]/div)



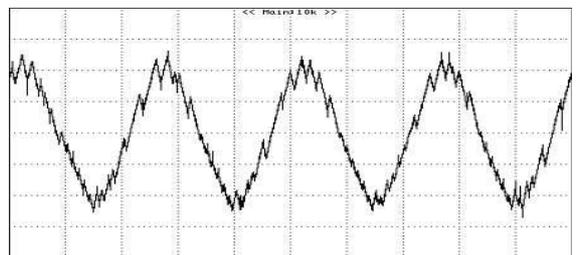
(f) 1 [kHz] (1000 [A]/div, 500 [us]/div)



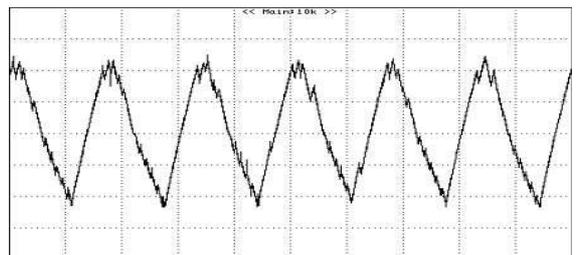
(a) 60 [Hz] (1000 [A]/div, 10 [ms]/div)



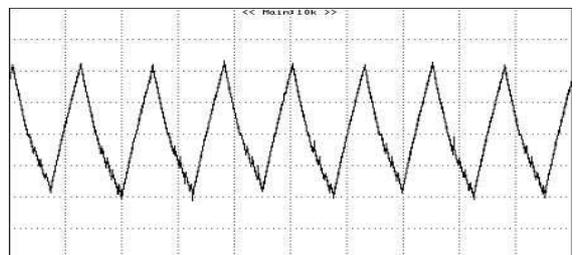
(b) 200 [Hz] (1000 [A]/div, 2 [ms]/div)



(c) 400 [Hz] (1000 [A]/div, 1 [ms]/div)



(d) 600 [Hz] (1000 [A]/div, 1 [ms]/div)



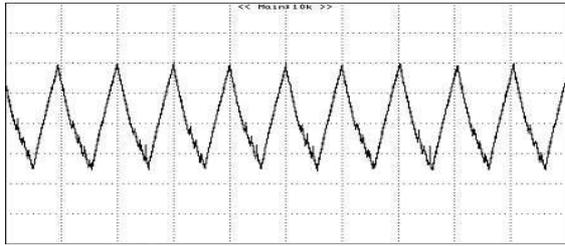
(e) 800 [Hz] (1000 [A]/div, 1 [ms]/div)

그림 8 출력전류 시뮬레이션 결과
Fig. 8 Output current simulation result

4. 실험 결과

시뮬레이션 결과를 바탕으로 실험을 수행하였다. 인버터 출력전압의 기본파의 주파수가 60 [Hz] 일때 부하전류를 1,500 [A] 가 되도록 설정한 후, 인버터 출력전압의 기본파 주파수를 60 [Hz] ~ 1 [kHz] 까지 증가시켜 가면서 부하전류의 크기를 측정하는 방식으로 진행하였다. 그림 9는 인버터 출력전류에 대한 실험과형을 나타낸다. 실험결과도 시뮬레이션 결과와 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림 10은 그림 9의 출력전류 파형의 실효값을 정리한 그래프이다. 60 [Hz]에서 600 [Hz] 구간 사이에서는 출력전류의 크기가 크게 변하지 않기 때문에 일반용 60 [Hz] 변압기로도 용접이 가능하다. 그러나 600 [Hz] 이상의 주파수 영역에서는 급격하게 출력전류가 작아짐을 알 수가 있다.



(f) 1 [kHz] (1000 [A]/div, 500 [us]/div)

그림 9 출력전류 실험 결과
Fig. 9 Output current experiment result

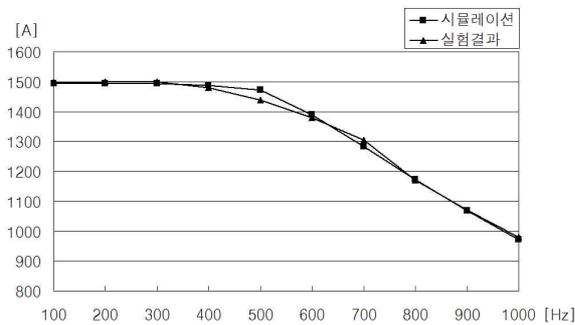


그림 10 주파수에 따른 출력전류 크기 변화
Fig. 10 Variation of output current according to the output frequency



그림 11 실험에 사용한 용접기 외형
Fig. 11 Experimental set up

그림 11은 실험용으로 제작된 용접기의 외형을 나타낸다.

그림 12는 두께 0.2mm인 니켈절편을 용접하고 있는 상태를 보이고 있는데, 그림 11의 용접기 출력에 전기적으로 웰드헤드를 접속한 후 용접모재를 헤드 사이에 넣고 충분히 가압한 상태에서 1500 [A]의 전류가 통전되고 있다. 용접후 강도검사를 한 결과 인장파단을 하였으며 그림 13은 충분한 강도의 용접결과를 보이고 있다,



그림 12 두께 0.2mm 인 니켈의 용접과정
Fig. 12 Welding of 0.2mm thick nickel



그림 13 두께 0.2mm 인 니켈의 용접결과
Fig. 13 Welding result of 0.2mm thick nickel

5. 결 론

본 논문에서는 마이크로 스폿용접과 같은 용접시간이 대단히 짧은 용접시스템에서 기존 하드웨어의 변경 없이 수 [ms] 대의 용접시간을 구현하는 것에 대한 연구를 하였다. 기존 방식의 경우 대전류 강압용 변압기를 사용하지 않고 MOSFET를 수십개 이상 병렬로 연결하여 사용하는 방식이었으나, 사용소자 수가 너무 많아지는 단점이 있다. 이에 반해 기존의 단상 IGBT 풀브릿지 인버터와 60 [Hz]용 일반 변압기만을 이용하여 수 [ms] 대의 스폿용접이 가능하도록 하는 시스템을 제안하였다. 그리고 실험을 통하여 600 [Hz] 까지 출력전류의 감소 없이 제어할 수 있었다. 또한 DC 출력전류가 필요한 응용분야에서는 제안한 회로에 정류기만 추가한다면 깨끗한 파형의 DC 출력전류를 얻을 수 있다. 추후 일반변압기를 고주파용 변압기로 대체하여 1 [ms] 이하의 용접시간을 확보하고자 한다. 본 연구결과는 최소비용으로 [ms] 이하의 정밀 용접을 가능하게 하는 기술개발에 참고가 될 것으로 기대한다.

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 2007-P-EP-HM-04-0000)

참 고 문 헌

- [1] 최민환, "특집:저항 용접기의 종류와 신개발 동향", *대한용접학회지*, 제15권, pp. 11-18, 1997.
- [2] 함효식, "단상 및 인버터 AC 저항용접 전류 영교차점의 냉각이 순시동저항 패턴에 미치는 영향", *대한용접학회 춘계 학술대회 개요집*, 제44권, pp. 308-310, 2005.
- [3] 오재훈, "인버터를 이용한 저항 용접 시스템의 구현", *전력전자기술대회 논문집*, pp. 172-175, 2006.
- [4] 탁정수, "AC 인버터 저항 용접기의 전원특성과 저항용접 특성에 관한 연구", *기계의 날 선포 및 2002년도 기계관련 산학연 연합심포지엄*, pp. 143-147, 2002.
- [5] 성세진, "고주파 전력 반도체 소자를 이용한 고성능 용접기 개발", *한국과학재단(과제번호: 911-0707-006-2)*, 1992.
- [6] 김태형, "인버터 저항 접 용접에서 스위칭 주파수에 따른 전류 파형 생성을 위한 회로 모델링에 관한 연구", *대한용접학회 2005년도 추계 학술대회 개요집*, pp. 108-110, 2005.
- [7] 조상명, "정밀저항시리즈 점용접에서 너트의 대칭성에 미치는 공정변수의 영향", *대한용접·접합학회지*, pp. 54-61, 2001.
- [8] 김명준, *저항용접*, 기문사, 1995

저 자 소 개



석진규(石鎭圭)

1983년 1월 12일생. 2008년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2010년 부경대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 지필로스 기술연구소 연구원.



강성관(姜聖瓘)

1973년 2월 19일생. 1999년 부경대 공대 생산가공공학과 졸업. 2002년 부경대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2008년~현재 부경대 공대 전기공학과 박사과정. 1999년~2001년 청송산업 개발부 근무. 2001년~2002년 (주)엠텍 연구소 근무. 2002

년~현재 웰텍시스템 대표.



송웅협(宋雄俠)

1983년 6월 30일생. 2009년 부경대 공대 전기제어공학부 졸업. 2009년~현재 부경대 대학원 전기공학과 석사과정.



노의철(魯義哲)

1960년 8월 2일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공박). 1997년~1998년 미국 Univ. of Wisconsin-Madison 방문교수. 2005년~2006년 미국 University of California-Irvine 방문교수. 1995년~현재 부경대 전기공학과 교수. 당 학회 학술이사.



김인동(金仁東)

1960년 8월 27일생. 1984년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 졸업(석사). 1991년 동 대학원 졸업(공박). 1991년~1996년 대우중공업 철도차량연구소 책임연구원. 1997년~1998년 미국 Univ. of Tennessee 방문교수. 2004~2005년 미국 Virginia Tech 방문교수. 1996년~현재 부경대 공대 전기공학과 교수. 당 학회 기획이사.



김흥근(金興根)

1956년 4월 24일생. 1980년 서울대 전기공학과 졸업. 1982년, 1988년 동 대학원 전기공학과(석사, 공박). 1990년~1991년 미국 Univ. of Wisconsin - Madison 방문교수. 2006년~2007년 미국 Michigan State University 방문교수. 현재 경북대 전자전기공학부 교수. 당 학회 경상지부장.



전태원(全泰園)

1959년 1월 30일생. 1981년 부산대 전기공학과 졸업. 1983년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997~1997년 Tennessee 대학 방문교수. 2005~2006년 미국 Virginia Tech 방문교수. 현재 울산대 전기전자정보시스템공학부 교수. 당 학회 부회장.