

## 서보컨 타입 인버터 스폿용접시스템

金奎植<sup>\*</sup>, 金鎮宇<sup>\*\*</sup>, 元忠淵<sup>\*\*\*</sup>, 崔世琬<sup>\*\*\*\*</sup>

## Servo Gun-type Inverter Spot Welding System

G.S. Kim, J.W. Kim, C.Y. Won, and S.W. Choi

## 요 약

저항 스폿 용접은 자동 용접라인 등에서 널리 사용된다. 최근에는, 대량으로 생산하는 산업현장에서 좀 더 정교한 품질 제어가 필요하게 되었고 마이크로프로세서를 채용한 제어의 다양한 적용으로 높은 생산성과 더 나은 용접 품질을 얻을 수 있게 되었다. 본 연구에서는 인버터 타입 파워 소스와 용접 서보건을 개발하였다. 그 결과, 기존의 공압건에 비해 몇 가지 장점을 갖게 되었는데 그 중의 하나는 용접공정 중에 정밀한 가압력 제어가 가능하게 되었다. 또한, 작업시간도 줄고 경비도 절감되는 부가 효과를 얻을 수 있다고 판단된다.

## ABSTRACT

Resistance spot welding is widely employed in a manufacturing process. In recent years, the requirement for more sophisticated quality control procedures has been in mass production industries. The requirements for high productivity and better weld qualities have lead to the development of more widely available microcomputer-based control. In this study, the inverter type power source and welding servo gun are developed. As the results, we have some advantages over the previous methods such as pneumatic gun. One of them is that the precise pressure control can be attained during the welding process. In addition, production time and cost can be decreased.

**Key Words** : Resistance spot welding, inverter, welding servo gun, pneumatic gun

## 1. 서 론

용접기술은 우리나라의 산업발전과 더불어 발달되어 왔으며, 조선, 항공, 자동차, 전기전자 제품분야 등 그 쓰이는 용도가 다양하다. 특히 국내 자동차 산업 및 가전업계의 성장과 더불어 저항 용접기의 수요가 늘고 있

다. 저항스폿용접(resistance spot welding)은 1877년 미국의 Elihu Thomson에 의해 발명된 용접공정으로 두 금속판을 전극 사이에 놓고 압력을 가하면서 0.3초 내외의 짧은 시간에 수천 암페어의 대전류를 흘려서 금속판 사이의 접촉저항으로 주열(Joule)열을 발생시켜 너겟(nugget)이 형성되도록 하는 전기저항용접의 일종이다<sup>[1-4]</sup>. 용접의 특징을 살펴보면 다음과 같다. 일련의 용접공정이 자동용접이면서 단시간에 용접이 되며, 가열영역이 용접부근에만 한정되므로 피용접물의 열변형이 적다. 또한 자동용접이기 때문에 작업자의 숙련도가 거의 필요없고 외형적으로 깨끗한 용접결과를 얻을 수 있는 장점이 있다. 그러나 대전류를 필요로 하기 때문에 용접기 및 수전설비의 전기용량이 커지고 용접전류, 용접시간, 가압력, 전극형상과 피용접물의 재질이나 판두께 등 각

\*정회원, 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 부교수

E-mail : gskim318@chollian.net

\*\*정회원, (주)Inter-M 연구소 전담연구원

\*\*\*정회원, 성균관대 전기전자 및 컴퓨터공학부 교수

\*\*\*\*정회원, 서울산업대 제어계측공학과 부교수

접수일자 : 2003. 4.29

1차심사 : 2003. 7. 7

2차심사 : 2003. 8. 4

심사완료일 : 2003. 8.18

각의 용접조건을 선정해야 하는 어려움이 있다. 이상과 같은 특징에서 스폿용접은 다량의 얇은 판을 대량, 능률적으로 용접하는 곳에 적합하다. 현재 산업현장에서 널리 적용되고 있는 싸이리스터의 위상제어를 이용한 스폿 용접기의 정전류 제어방식은 짧은 용접과정에서의 동저항 변화특성을 고려하지 않아 스패터(spatter)가 많이 발생되어 용접품질의 저하 및 용접 주위의 오염을 초래하는 단점이 있다. 이를 보완하기 위해 인버터 방식에 의한 정전력 제어<sup>[5]</sup>가 도입되었으나 이 역시 비선형 시스템이며 제어기의 구성이 쉽지 않은 단점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 인버터 제어 방식을 채용한 저항 스폿 용접제어기의 설계 및 비선형 피드백 방식에 기초한 정전력제어 알고리즘을 구현코자 한다<sup>[6]</sup>. 본 연구에서 채용한 선형화 제어기는 구조가 간단하여 실현이 쉽다. 근본적으로 선형시스템이기 때문에 이득튜닝(gain tuning)이 쉬운 선형시스템의 장점을 갖는다. 이와 함께 용접 공정중에 실시간으로 가압력의 크기를 변화시키기 위한 서보건의 상품화가 최근 활발히 진행되고 있다. 로봇의 컨트롤러와 용접건(welding gun)의 서보(servo)화로서 일체형 컨트롤러를 구축한 서보건(servo gun)<sup>[7][11]</sup> 채용으로 사이클 타임(cycle time) 단축과 팁(tip)의 마모 보정이 가능하도록 기술개발이 진행되고 있다.

## 2. 본 론

### 2.1 서보건을 이용한 가압력제어

건을 이용한 저항 스폿용접공정은 접근-가압-용접-유지-휴지 단계로 이루어져 있다. 「접근」 단계에서는 용접할 부위로 전극이 이동하는 순간이며 이 때에는 정확한 위치제어가 필요하다. 서보건 용접기는 모재에 거의 완벽하게 접근을 할 수가 있어 시편에 거의 맞붙은 상태에서 가압을 행사할 수가 있으므로 충격에 의한 모재의 변형도 거의 줄일 수가 있다. 「가압」 단계에서는 용접되는 시편과 시편사이가 금속접촉을 일으키게 하며 저항을 원하는 수준으로 끌어내리는 역할을 한다. 가압이 설정가압 보다 낮은 경우는 시편과 시편이 금속접촉이 안되므로 불순물이 많이 포함되어서 전극과 전극사이에서도 결합이 발생하는 등 용접품질이 좋지 못하게 된다. 기존의 공압건에서는 이러한 가압단계에서 시편의 함몰현상을 가중시키는 역할을 한다. 반대로 금속접촉 이상의 불필요한 가압력일 경우에는 저항이 줄어들게 되므로 줄(Joule)열을 감소시켜 충분한 너겟이 형성되지 않는다. 서보건에서는 가압의 실시간 변화가 가능하므로

가압제어를 통해 위와 같은 문제를 해결하고 기존의 공압건에 비해 우수한 용접품질을 얻을 수 있다. 「용접」 단계는 설정된 용접전류를 용접시간동안 흐르게 하면서 용융이 발생하는 실제 용접공정중 용접품질을 결정하는 가장 중요한 부분이다. 이 시간은 보통 0.3초 안팎의 짧은 시간으로서 아주 빠른 공정이다. 이 구간 중에서는 용접부위가 용융이 되면서 팽창하고 팽창력이 압력을 이기지 못하게 되면 함몰의 현상이 발생하게 된다. 아주 빠른 공정이므로 이 구간에서는 다른 노이즈 성분이 많이 포함이 되어 있으며 또한 열에 의한 상태변화를 일으키는 부분이므로 상당히 복잡한 공정단계이다. 「유지」 단계에서는 급속 재결합이 일어나서 서서히 식을 수 있도록 압력을 유지시켜주는 부분이다. 필요 이상의 압력으로 인해서 함몰현상이 발생하므로 가압력을 용접 단계보다 줄여준다. 다음에는, 가압력을 제거시키고 다음 용접 목표를 향해서 움직이는 「휴지」 단계로 이어진다. 여기에서 다시 「접근」 단계로 이어지는 데 이 부분은 용접의 품질과는 관계없는 부분이지만 전체 용접 공정시간의 대부분을 소요하는 시간이다. 서보건 용접기의 경우는 공압건과 같이 항상 일정거리로 회귀할 필요가 없으므로 연속타점일 경우 시간절약 효과를 볼 수 있다. 그림 1은 용접공정별 전극의 위치와 가압의 방향을 나타내고 있다.

서보건을 이용한 저항 스폿 용접기는 크게 서보건(servo-gun), 타이머(timer), 용접전원(welding power)으로 구성된다. 서보건은 가압력을 생성하기 위한 서보 모터와 모터의 회전운동을 타이밍 벨트(timing belt)에 의해 평행축으로 힘을 전달하고 볼 스크류(ball screw)에 의해 회전운동을 전극의 직선운동으로 변환한다.

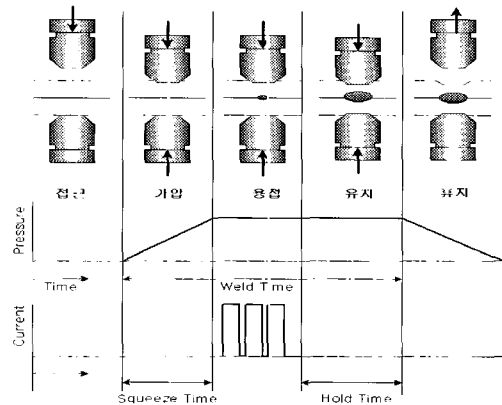


그림 1 용접 공정별 전극의 제어  
Fig. 1 Electrode control during welding

이때 LM 가이드(linear motion guide)는 직선운동의 축을 잡아주는 역할을 한다. 모터에 의한 토크 명령은 회전운동을 직선운동으로 전환하는 타이밍 벨트와 볼 스크류에 의해 가압력을 생성하는데 토크를 전달하기 위한 기계적인 특성에 의해 볼 스크류와 LM 가이드의 마찰력이라는 외란과 하부전극의 휨 현상이 있다. 타이머의 기능은 스폿 용접시 패넌의 조건에 따라 가압시간, 전류의 지속시간, 용접전류의 크기, 타점수 등의 용접조건을 설정하는 제어장치이다. 이외에도 패넌에 용접건의 팁이 용착되어 떨어지지 않을 경우 이를 검출하는 용착 검출기능, 전력 공급용 케이블 단락이나 단선을 검출하는 기능, 가압의 정도를 제어할 수 있는 가압력 제어기능과 용접전류를 균일하도록 만들어 양질의 용접조건을 확보하기 위한 전류 자동제어기능 등을 갖춘다. 그림 2에서 볼 수 있듯이, 타이머는 서보 모터를 제어하기 위해 엔코더(encoder)를 이용해 전극의 위치, 토크 값을 피드백 받고 명령을 내린다. 한편, 서보건의 구조는 그림 3과 같다. 서보 모터, 타이밍 벨트, 볼 스크류와 LM 가이드, 동력 전달부 등 기계적 부품을 사용한 구동계와 용접에 필요한 용접용 트랜스, 건암 등의 전력 공급계를 분리시켜 하나의 브라켓에 구성하고 별도의 제어시스템을 갖추고 있다. 서보건의 장점을 정리하면 다음과 같다.

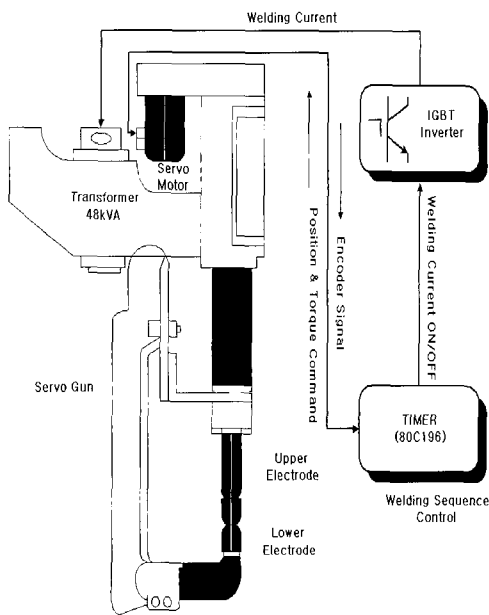


그림 2 서보건을 이용한 저항 스폿용접 시스템  
Fig. 2 Resistance spot welding system with a servo gun

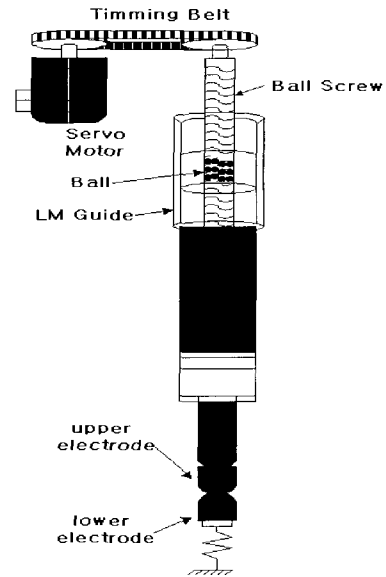


그림 3 서보건의 내부구조  
Fig. 3 Internal structure of servo gun

i) 피용접물에 대한 전극의 가벼운 접촉과 가압으로 피용접물의 변형이 적어 용접품질이 향상된다. 서보건은 적은 충격력으로 전극이 피용접물에 접촉하여 스폿용접에 필요한 가압력을 얻을 수 있는 것이 큰 장점이다. 종래의 공압건에서는 공기압 작동의 실린더를 이용하고 공기압 실린더에는 고속의 압축공기가 공급된다. 이때 실린더내의 피스톤은 고속으로 이동하게 되고 피스톤에 붙어있는 전극은 피용접물에 충돌하게 된다. 이 동작이 몇분의 1초라고 하는 짧은 시간에 이루어지기 때문에 그 에너지는 대단히 크고 피용접물을 통해서 지그에 전달하게 된다. 결과적으로 피용접물, 지그 및 크래프의 구조적인 강성을 크게 요구하게 한다. 그러나 서보건에서는 전극의 이동을 서보모터의 위치제어기능을 이용하여 고속이동영역과 저속이동 영역으로 나누어 운동위치에 따라 피용접물에 적은 충격력의 가벼운 접촉이 가능하여 피용접물의 변형을 최소화 할 수 있다.

ii) 전극벌림(stroke)의 임의조정이 가능하다. 서보 모터의 위치제어기능을 이용하여 전극의 벌림(open stroke)을 임의로 변경하는 것이 가능하다. 즉, 서보건은 큰 전극 벌림에서 피용접물의 타점위치에 접근한 후 피용접물과 지그에 간섭이 되지 않는 범위에서 피용접물 형상에 맞는 최적의 전극의 벌어짐을 선택하는 것이 가능하다. 또한, 용접로봇의 위치제어에서 그 전극 벌림의 조정이 가능하게 한다.

iii) 임의 가압력 조정이 가능하다. 서보건의 전극이 피용접물에 접촉되면 서보모터의 제어방식은 토오크 제어기능으로 전환하고 서보모터의 토오크를 제어하여 가압력을 조정할 수 있다. 피용접물의 두께 및 겹치는 매수 또는 재질에 따라 가압력을 조절해야 하지만, 종래의 공압건은 항상 일정한 공기압이 공급되므로 피스톤의 가압력을 조정하기가 쉽지 않았다.

iv) 전극의 가벼운 접촉으로 전극이 피용접물에 닿는 충돌음이 적다. 서보건에서는 전극의 이동을 서보 모터의 위치제어기능을 이용하여 고속 이동영역과 저속이동영역으로 나누어 운동위치에 따라 제어가 가능하여 전극이 피용접물에 닿는 순간에 가벼운 접촉과 적은 충격력으로 피용접물에 닿는 충돌음이 적지만, 종래의 공압건에서는 실린더내의 피스톤이 고속으로 이동하게 되어 피스톤에 붙어있는 전극은 고속에서 피용접물에 충돌하게 된다. 이때에 큰 충돌음이 발생한다.

v) 서보건에서는 압축 공기가 필요치 않아 실린더 배기음이 없고 압축공기에 포함된 미세한 윤활유의 비산 등이 없어 작업장내의 분진방지 등 작업환경을 개선한다. 또한, 공기압 배관기기 및 그 공사가 필요치 않아 설비투자금액이 저감된다.

2.2 정전류 제어기의 구성

기존의 싸이리스터를 이용한 스폿 용접기에서는 용접 중의 용접 부위의 동저항 변화 특성을 감안하지 않은 정전류 방식이 그 주류를 이루어 왔기 때문에 용접 부위에 가해지는 주울 열은 동저항 변화에 따라서 가열 및 냉각의 사이클을 반복한다. 이 가열 및 냉각은 스파터발생의 한 원인으로 작용하게 되므로 용접 부위의 동저항이 용접 도중에 변하더라도 용접 부위에 가해지는 주울 열을 일정하게 유지할 수 있는 하나의 방법으로서 정전류 제어기법이 도입되었다. 본 연구 개발에서는 미분기하학(differential geometry) 이론에 기초를 둔 비선형화한 선형화기법(nonlinear feedback linearization technique)을 응용한 정전류 제어방식을 채용하여 제어기를 구성한다. 본 연구에서 사용되는 용어 및 약어 정의는 다음과 같다.

- $P\_ref(t)$  : 전력설정치 (power command)
- $P\_real(t)$  : 전력측정치(measured power  $\equiv v * i$ )
- $e(t)$  : 전력오차 ( $= P\_ref - P\_real$ )

- $v_{t1}(t)$  : 변압기 1차측 전압
- $v_{t2}(t)$  : 변압기 2차측 전압
- $v(t)$  : 전극 팁양단 전압
- $i(t)$  : 변압기 2차측 전류
- $R(t)$  : 전극 팁양단 저항
- $L$  : 변압기 2차측 인덕턴스
- $N$  : 변압기 권선비 ( $\equiv N_1 / N_2$ )
- $K$  : 파워 증폭기 이득(gain)
- $k_p (k_i)$  : 비례 (적분) 이득 상수

그림 4는 저항 스폿용접의 정전류 제어기에 대한 개괄적인 블록선도를 보여주고 있다. 정전류 제어 방식은 기존의 싸이리스터를 이용한 스폿 용접기에서 주류를 이루어온 방식으로 정전류 방식과는 달리 피드백된 전압이 불필요하여 비용 측면에서는 우수하다. 그러나 용접 부위의 동저항 변화 특성을 고려하지 않아 이때 용접 부위에 가해지는 단위시간 당 주울 열은 이 동저항 변화에 따라서 일정치 않다. 이것은 스파터 발생의 한 원인으로 작용하게 되므로 용접 부위의 동저항이 용접 도중에 변하더라도 용접 부위에 가해지는 주울 열을 일정하게 유지하는 하나의 방법으로서 그림 5와 같은 정전류 제어기법이 나오게 되었다.

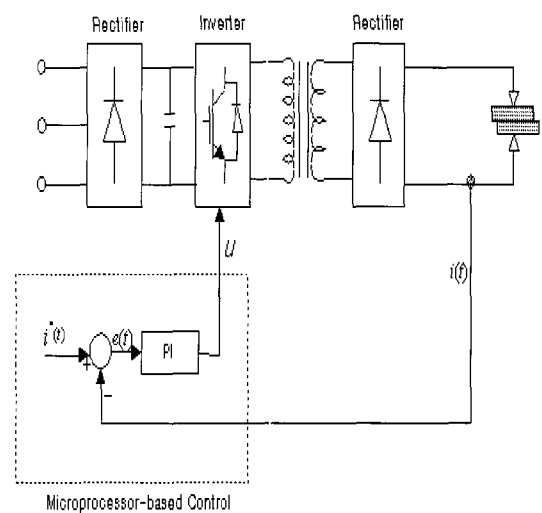


그림 4 정전류 제어시스템의 블록선도  
Fig. 4 Block diagram of constant current control system

그림 5의 정전력 제어 시스템을 모델링하기 위해서 그림 6과 같은 간단한 변압기와 부하 모델의 등가회로를 식으로 표현해 본다. 그림 6의 단순화된 변압기 모델로부터 2차측 동적방정식은 다음과 같다.

$$v_{t2}(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R(t) i(t) \quad (1)$$

또한 1차측 동적방정식은 다음과 같다.

$$P_{real}(t) = v(t) i(t) = R(t) i^2(t) \quad (2)$$

$$e(t) = P_{ref}(t) - P_{real}(t) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} v_{t1}(t) &= K(k_p e(t) + k_i \int e(t) dt) \\ &= N v_{t2}(t) \end{aligned} \quad (4)$$

다음에는 시스템 제어용 블록선도에 대해 알아본다.  $R(t)$ 가 시간의 함수이기 때문에 Laplace Domain (s-Domain) 에서 표현하기가 곤란하다. 따라서 텡양단 저항  $R(t)$ 를 용접전류나 용접전압변수에 비해 동적응답특성이 느린 매개변수로 볼 수 있으므로 상수  $R$  로 가정하고 수식을 전개해 보면 다음과 같다.

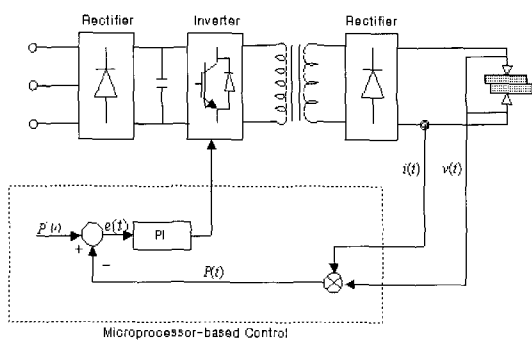


그림 5 정전력 제어 시스템의 블록선도  
Fig. 5 Block diagram of constant power control system

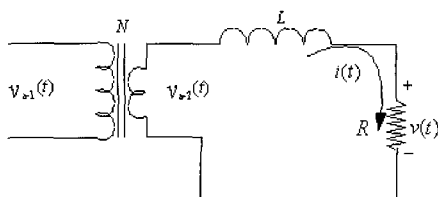


그림 6 변압기와 부하모델의 등가회로  
Fig. 6 Equivalent circuit of transformer and load model

$$\frac{I(s)}{V_{t2}(s)} = \frac{1}{Ls + R} \quad (5)$$

$$\frac{V(s)}{V_{t2}(s)} = \frac{R}{Ls + R} \quad (6)$$

이들로부터 그림 7과 같은 기존 정전력 제어 시스템의 블록선도를 얻을 수 있다.

그림 7에서 \*는 convolution을 의미한다. time-domain 에서 곱셈은 s-domain에서 convolution 이기 때문이다. 한편, 비록 텡 양단 저항이 상수라 하더라도 그림 7의 플랜트는 비선형구조를 갖고 있다. 이로 인해 제어성능이 떨어지거나 이득 튜닝(gain tuning)이 어려워진다. 식 (1)-식 (6)까지를 살펴보거나 그림 7에서 알 수 있듯이 본 시스템은 비선형 시스템이다. 따라서 제어기 이득 튜닝도 힘들뿐만 아니라 각 동작점마다 동특성이 달라지며 응답특성의 예측이 어렵다. 이를 극복하기 위해 최근에는 동작점마다 선형화 기법을 사용하여 선형화하는 방법이 이용되고 있다. 본 연구에서는 미분기하 이론에 기초를 둔 비선형 궤환 선형화기법을 이 시스템에 응용함으로써 완전한 선형시스템으로 만들어 제어하고자 한다. 식 (2)로부터 다음을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} P_{real}(t) &= \left[ \frac{d}{dt} v(t) \right] i(t) + v(t) \left[ \frac{d}{dt} i(t) \right] \\ &= (-Rv/L + Rv_{t2}/L) i \\ &\quad + (-Ri/L + v_{t2}/L) v \\ &= -\frac{2R}{L} i v + \frac{v_{t2}}{L} (Ri + v) \\ &= -\frac{2R}{L} P_{real} + \frac{v_{t2}}{L} (2v) \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 새로운 입력  $\bar{u}$  를 다음과 같이 정의하면,

$$\bar{u} = \frac{v_{t2}}{L} (2v) \quad (8)$$

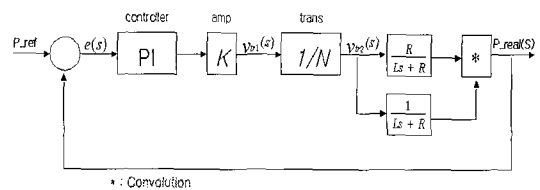


그림 7 기존 정전력 제어 시스템의 블록선도  
Fig. 7 Block diagram of conventional constant power control system

식 (7) 은 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} P_{real}(t) = -\frac{2R}{L} P_{real} + \bar{u} \quad (9)$$

식 (9) 에서 볼 수 있듯이 이 시스템은 완전한 선형 시스템으로 바뀐다. 식 (9) 로부터 다음과 같은 그림 8 의 블록선도를 얻을 수 있다. 그림 8은 완전한 선형시스템이므로 전체 시스템이 선형으로 동작한다. 또한 PI 이득은 그림 8에서 R 과 L 의 범위가 주어지면 쉽게 구할 (tuning) 수 있다. 실제적인 제어를 살펴보면 다음과 같다.  $\bar{u}$  는 식 (9) 나 그림 8로부터 다음과 같이 주어진다.

$$\bar{u} = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt \quad (10)$$

식 (8) 과 식 (10) 로 부터 다음 식을 얻을 수 있다.

$$v_{m2} = \frac{L}{2v} (k_p e(t) + k_i \int e(t) dt) \quad (11)$$

식 (4) 와 식 (11) 로 부터 다음을 얻을 수 있다.

$$v_{m1} = \frac{NL}{2v} (k_p e(t) + k_i \int e(t) dt) \quad (12)$$

이때 파워증폭기 이득이 K 이므로 D/A 변환기의 출력값은  $v_{m1}/K$  임을 알 수 있다. 제어를 위한 블록 선도는 그림 9에 있다. 이 이론의 물리적인 의미를 다시 살펴본다. 식 (12)에서 변압기에 가해지는 입력  $v_{m1}$  은 일반적인 PI 에 상수 N 과 L 이 곱해지고 용접전압  $v$  로 나뉘어졌다. 따라서, 용접초기에 용접전압  $v$  가 작을 때 일반적인 PI 보다 출력이 커지고 점차 시간이 흐를 수록 용접전압  $v$  가 줄어들어 PI 출력이 정상으로 돌아오는 역할을 한다. 그 결과 과도특성이 뛰어나 빠른시간에 용접전력이 유입되는 장점이 있다.

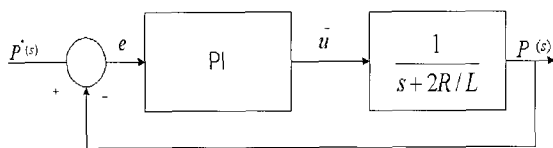


그림 8 완전한 선형 시스템으로 바뀐 블록선도  
Fig. 8 Block diagram of completely linearized system

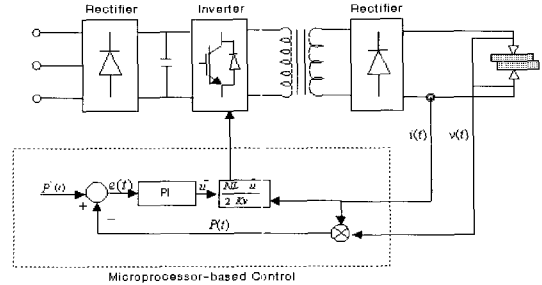


그림 9 선형화 제어를 위한 블록선도  
Fig. 9 Block diagram for linearized control

### 3. 실험 및 결과

본 연구를 위해 개발한 서보건의 외형이 그림 10과 같다. 이 서보건은 서보 모터의 토크를 제어하고 타이밍 벨트와 볼 스크류에 의해 운동방향을 직선운동으로 변환하여 가압력을 발생시킨다. 따라서, 자동차 용접라인과 같은 산업현장에서 최종적인 힘인 가압력을 정밀하게 제어하기 위해서는 전극의 팁 끝에 압력센서 (force sensor)를 부착하고 가압력을 측정하여 이를 가압력 명령치와 비교하여 제어해야겠지만 실제로 용접라인에서 가압력센서를 부착하여 저항스폿용접을 행하기가 무척 불편하여 이와 같은 완전한 의미로의 페 루우프 제어는 행하지 않는다.

따라서, 첫번째 실험에서는 토크명령을 주었을 때 용접공정중 생성되는 가압력이 선형적인 관계를 가지는지

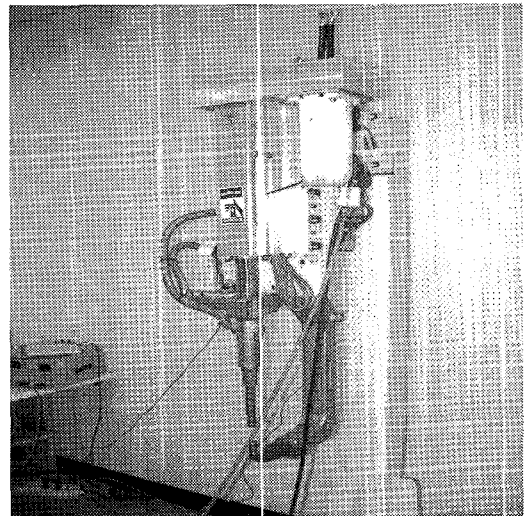


그림 10 서보건의 외형  
Fig. 10 External shape of a servo gun

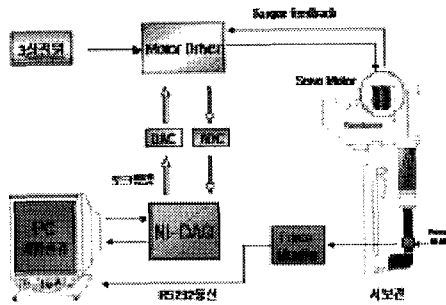


그림 11 선형특성 실험을 위한 시스템 구성  
Fig. 11 System configuration for linear characteristics test

를 알아보기 위한 실험을 행한다. 실험장치는 서보건을 제어하기 위해 Windows 98 환경에서 Visual C++으로 구현하여 서보모터의 토크제어를 행하였고, 제어신호 입출력으로는 National Instruments사의 데이터취득카드(Data acquisition card)를 이용하였다. 또한 서보 모터 드라이버, 서보 모터, 서보건으로 구성하였으며, 가압력 측정은 PC에서 모터에 토크를 명령하고 전극과 모재 사이에 입력센서를 넣고 측정하였다. 가압력을 모니터링을 위해 PC와 RS232통신을 할 수 있도록 시스템을 구성하였다. 실험을 위한 시스템 구성은 그림 11과 같다.

실험에 사용된 서보 모터와 가압력 측정장치의 사양과 모재는 다음과 같다.

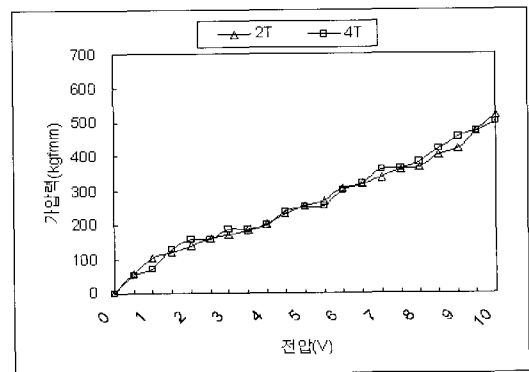
- 서보 모터: 3상 AC Synchronous Servo Motor
- 정격파워: 750 W
- 극수: 8
- 정격속도: 3000[rpm]
- 최대속도: 4500[rpm]
- 정격토크: 2.4 [N.m]
- 최대 토크: 7.1[N.m]
- Force Monitor (모델명: PMAC 2000)
- 모재 : 알루미늄 (2T, 4T), 스테인레스 (2.5T, 5T)

또한, PC와 가압력 측정장치사이의 인터페이스로 RS232통신을 하기 위한 조건설정은 다음과 같다.

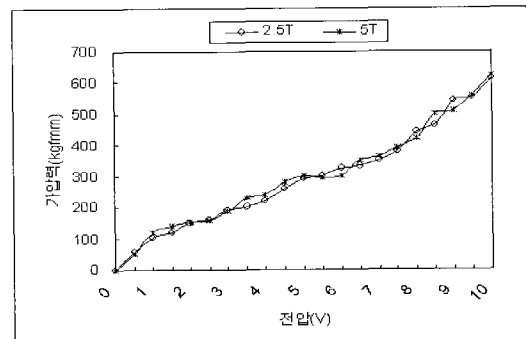
- Baud Rate = 9600
- Parity = None
- Data Bits = 8 Bit
- Stop Bits = 1 Bit
- Flow Control = None
- Format = ASCII

실제 용접시 쓰이는 가압력의 크기는 대략 150-300 [kgf]의 값을 요구하게 되며 전압으로 표현된 모터토크 명령치와 측정된 가압력 사이의 선형특성 실험결과는 그림 12와 같다. 실험결과에서는 약간에 오차가 발생했는데 이는 서보건의 힘 전달구조에 따른 오차와 토크명령에 따른 타이밍 벨트와 볼 스크류에 의한 마찰성분이 큰 영향을 주고 하부전극의 힘에 의한 강성 성분도 오차에 영향을 주는 것으로 판단된다.

두 번째 실험에서는 인버터 용접전원 장치의 정전류 제어방식 방식과 정전력 제어방식의 성능평가 실험을 행하였다. 먼저 그림 13과 표 1은 가압력 및 용접실험을 위한 전체시스템 구성도와 용접실험조건이다. 먼저 정전류/정전력 제어방식의 실험을 위해서 변압기 2차측에 toroidal coil을 통한 전류와 두 전극사이의 전압을 피드백 받아 정전류 및 정전력 제어를 행한다.



(a) 알루미늄인 경우



(b) 스테인레스인 경우

그림 12 토크명령에 따른 서보건의 선형특성 실험  
Fig. 12 Experimental results of linear characteristics test

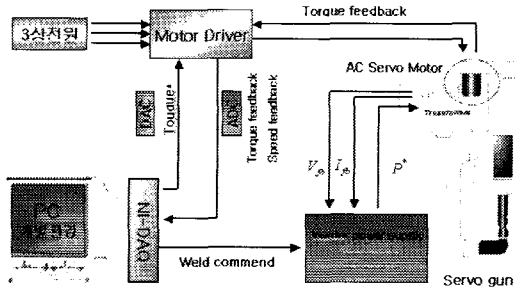
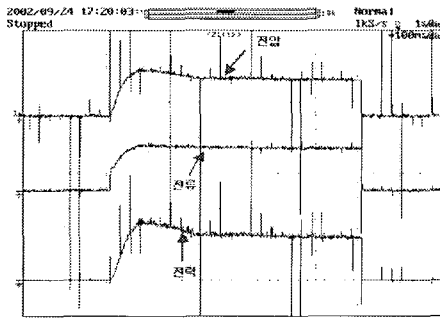


그림 13 용접품질시험 구성도  
Fig. 13 Configuration of welding quality test system

표 1 용접시험 조건  
Table 1 Welding test condition

전 원	3상 380V	가압의 크기[kgf]	180~400
변압기 권선비	250	제어방식	정전류 / 정전력
냉각방식	수냉식	용접전류	6[kA]
모재의 종류	스테인레스	용접전력	7[kW]
모재의 두께	2T		

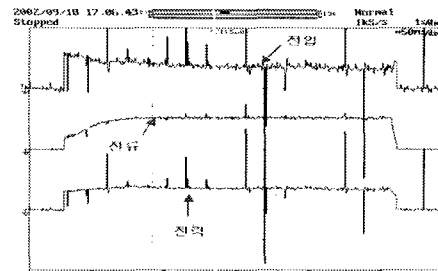


( 전압 [2V/div], 전류 [5kA/div], 전력 [10kW/div], 100msec/div )

그림 14 정전류 제어방식의 실험결과  
(정전류 명령치 : 6[kA])  
Fig. 14 Experimental results for constant current control method

그림 14의 정전류 제어방식의 경우에는 용접공정시 동저항 변화 특성을 고려하지 않아 전류는 일정하나 공급된 전력은 일정치 못함을 볼 수 있다. 그러나 그림 15의 정전력 제어방식은 용접공정시 동저항 특성을 고려하여 전류와 전압 특성이 달라지더라도 용접공정동안 항상 일정한 파워를 공급된다는 것을 알 수 있다. 이

는 용접품질의 균일과 이에 따른 인장강도의 향상, 그리고 스패터의 저감 등과 같은 많은 이점이 있다. 그림 16은 정전력제어시 정전력명령을 7[kW]로 하고 가압력의 크기를 각각 180[kgf] 과 400[kgf]로 가하면서 가압력 및 전력의 동특성을 살펴보았다.



(전압 [2V/div], 전류 [4kA/div], 전력 [10kW/div], 50msec/div )

그림 15 정전력 제어방식의 실험결과  
(정전력 명령치: 7[kW])  
Fig. 15 Experimental results for constant power control method

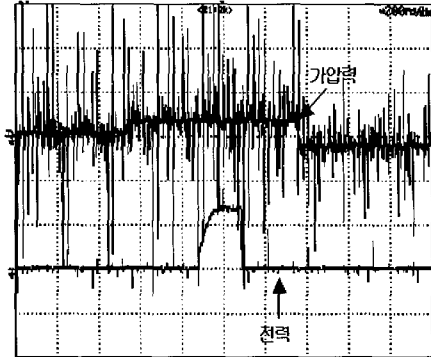
그림 16에서 볼 수 있듯이 용접공정 중 토크명령을 주었을 때 가압력이 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 하지만 실제 용접공정 중에는 모재가 순간적으로 녹을 때 전극이 약간 이동을 하여 가압력을 계속 유지하므로 약간의 함몰현상이 생길 수 있다. 이를 보완하기 위해서는 용접공정 후반부에 가압력 설정을 조금 낮게 설정을 해주어야 한다.

세 번째 실험에서는 용접조건에 따른 인장강도 시험을 행하였다. 표 2는 스테인레스 1.5T에 대한 용접의 인장강도 실험결과를 보여준다. 용접시간(120ms - 160ms), 가압력(200kgf - 400kgf), 정전력(8kW - 11kW)로 변화시키면서 용접조건마다의 너겟직경과 인장강도 실험을 한 결과이다. 인장강도 값에 밑줄친 부분이 스패터가 거의 없는 경우이다.

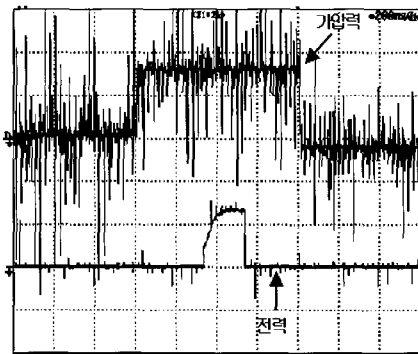
표 2의 실험결과에서 볼 수 있듯이 스테인레스 1.5[T]와 같은 모재의 경우는 용접시간을 120 msec로 짧게 해 주고 가압력은 400[kgf]로 설정해 주는 것이 스패터 발생을 억제 할 수 있고 인장강도가 좋음을 알 수가 있었다.

향후에는 각각의 모재와 용접조건에 따른 실험결과를 데이터베이스화하고 이를 용접공정 중 실시간으로 적용할 수 있는 용접조건 실험이 필요할 것으로 사료된다. 그림 17은 정전력 제어방식에서 스테인레스 1.5[T] 시편에 스폿 저항용접을 한 결과이다.





(a) 가압력 명령치:180[kgf], 정전력 명령치:7[kW] 일 때



(b) 가압력 명령치:400[kgf], 정전력 명령치:7[kW] 일 때

(가압력 [200kgf/div], 전력 [5kW/div], 200msec/div)

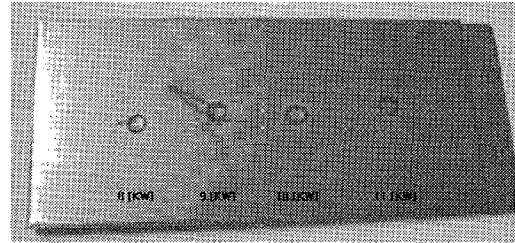
그림 16 정전력 제어시 가압력 및 용접전력 파형

Fig. 16 Waveform of pressure and welding power

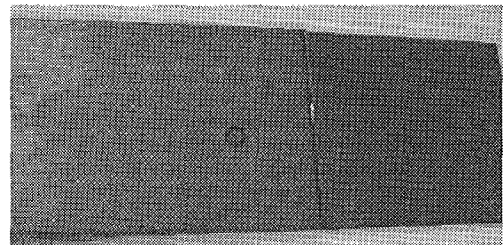
표 2 정전력제어시 너겟직경 및 인장강도 측정 결과  
Table 2 Nugget diameter and stretch strength test

용접시간 (ms)	정전력 (kW)	가압력 200(kgf)		가압력 300(kgf)		가압력 400(kgf)	
		너겟 직경 (mm)	인장 강도 (kgf)	너겟 직경 (mm)	인장 강도 (kgf)	너겟 직경 (mm)	인장 강도 (kgf)
120 ms	8	3	616	3.8	625	3.6	424
	9	3.5	708	4	617	4	575.5
	10	4	585	4.2	756	4.2	719.5
	11	4.2	665	5	819	4.5	848.5
140 ms	8	4	679.5	4.1	633.5	4	692
	9	4.2	700	4.2	616	4.2	719.5
	10	4.6	835.5	4.5	838.5	4.5	753.5
	11	5	868	5	933.5	5.1	966
160 ms	8	4.1	736	4	734.5	4.1	684.5
	9	4.5	816	4.3	608	4.5	825
	10	5	901.5	4.6	933.5	5	944
	11	5.1	931	5.2	836	5.4	933

사용모재 : 스테인레스 (1.5T), 스페터발생(무) : 684



(a) 정전력 : 8-11 [kW], 가압력 : 200 [kgf], 용접시간 : 120 [ms]



(b) 정전력 8 [kW], 가압력 300 [kgf], 용접시간 : 120 [ms]

그림 17 정전력 제어방식의 용접 결과

Fig. 17 Welding results of constant power control

#### 4. 결 론

본 연구에서는 서보컨 및 인버터식 스폿용접시스템의 성능 향상을 위한 전체 시스템을 구성하고, 실험을 통해 이를 고찰하였다. 기존 공압실린더를 이용한 공압건은 정확한 가압력 제어가 어려워서 모재의 두께, 재질 등에 따른 최상의 용접조건을 갖는 용접데이터베이스를 구축한다 하더라도 가압력이 제대로 설정치를 추종하지 못하므로 양호한 용접결과를 얻기 힘들었다. 이에, 서보컨의 가압력 제어를 위한 서보컨 시스템을 구축하고 용접 공정중 가압력 제어를 함으로써 서보컨의 선형특성을 알아보았다. 서보컨의 토크명령에 따른 선형특성 실험 결과 서보컨의 기계적인 마찰에 의한 손실로 약간의 손실이 발생함을 알 수 있어 마찰성분을 고려한 정밀한 가압력 제어가 필요함을 알 수가 있었다. 두 번째로, 인버터식 스폿용접기의 정전류 제어방식과 정전력 제어방식의 성능평가 실험을 행하였다. 정전력 제어방식은 용접공정시 동저항 특성을 고려하여 전류와 전압 특성이 달라지더라도 용접공정동안 항상 일정한 파워어를 공급된다는 것을 알 수 있었다. 이는 용접품질의 균일과 이에 따른 인장강도의 향상, 그리고 스패터의 저감 등과 같은 많은 잇점을 갖고 있다.

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R01-2001-000-00306-0) 지원으로 수행되었음.

저 자 소 개

참 고 문 헌

[1] B.N. Waller and P.M. Knowlson, "Electrode separation applied for quality control in resistance welding", *Welding Journal*, Vol. 44, No. 4, pp. 168~174, 1965.

[2] W.F. Savage, E.F. Nippes, and F.A. Wassel, "Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds", *Welding Journal*, Vol. 57, No. 2, pp. 43~50, 1978.

[3] D.W. Dickinson, J.E. Franklin, and A. Stanya, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring", *Welding Journal*, Vol. 59, No. 6, pp. 170~176, 1980.

[4] S.R. Patange, T. Anjaneyulu, and G.P. Reddy, "Microprocessor-based Resistance Welding Monitor," *Welding Journal*, Vol. 64, pp. 33~38, Dec. 1985.

[5] Inverter type Spot Welding Power Supply, Miyachi Technical Report, 1996.

[6] Jun Seo Moon, Gyu-Sik Kim, Jae-Mun Kim, and Chung-Yuen Won, "Power Control of Resistance Spot Welding System with High Dynamic Performance", *IEEE IECON' 97*, Vol. 2, pp. 845~849, Nov. 1997.

[7] Spot Welding Control Method and Apparatus using a Servo Gun, US Patent, Patent number : 5,582,747, Date of Patent : Dec. 10, 1996.

[8] 로봇 용접건의 서보제어장치, 일본특허 특허출원공개번호 : 특개평10-99973, 공개일 : 1998년 4월 21일.

[9] 전동서보식 저항용접장치의 제어방식과 제어장치, 일본특허 특허출원공개번호 : 특개2001-300738, 공개일 : 2001년 10월 30일

[10] 박지환, "저항 점 용접 공정에서 품질 향상을 위한 가압력 제어", KAIST 석사졸업논문, 1999.

[11] Jin-Woo Kim, Gyu-Sik Kim, Chung-Yeun Won, and Se Wan Choi, "Linearized control of inverter resistance spot welding system", *Proceeding of ICMIT '01*, pp. 319~323, Dec. 2001.

[12] 김재문, 김이훈, 민병권, 원충연, 김규식, 최세완, "진화 알고리즘을 이용한 인버터 스폿용접기의 가변전력 제어", *전력전자학회 논문지*, 7권, 4호, pp. 384~394, 2002. 8.

[13] 김재문, 원충연, 최규하, 김규식, 목형수, "순시전력 제어를 통한 스폿용접기의 용접품질 향상", *전력전자학술대회 논문집*, pp. 558~562, 1999. 7.

김규식(金奎植)



1958년 8월 25일생. 1981년 2월 서울대 전자공학과 졸업. 1983년 2월 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 1990년 8월 동 대학원 제어계측공학과 졸업(박사). 1988년~1992년 대우중공업 중앙연구소 선임연구원. 1993년~현재 서울시립대학교 전자전기컴퓨터공학부 부교수.

김진우(金鎭宇)



1975년 9월 17일생. 2003년 2월 서울시립대 전자전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 현재 (주)Inter-M 연구소 전담연구원.

원충연(元忠淵)



1955년 5월 10일생. 1978년 성균관대 전기공학과 졸업. 1980년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1987년 12월~1992년 12월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 방문교수. 1988년 3월~현재 성균관대학교 전기전자 및 컴퓨터 공학부 교수. 당 학회 부회장.

최세완(崔世琬)



1963년 3월 3일생. 1985년 인하대 전자공학과 졸업. 1992년 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년~1997년 삼성전기 종합연구소 수석연구원. 1997년~현재 서울산업대 제어계측공학과 부교수. *Journal of Electrical Engineering and Information Science* 편집위원 및 당 학회 편집위원.