

마이크로프로세서를 이용한 점용접 공정제어

Application of Microprocessor to Control of Spot Welding Processes

조형석*
Hyung Suck Cho

1. 서 론

저항 용접(resistance welding)의 원리는 1877년 Elihu Thompson이 Leyden 병의 방전실험을 하던 중 우연히 발견되었다. 저항 용접에는 여러가지가 있는데, 그 중 제일 기본적인 점 용접(spot welding)의 원리는 금속판(metal sheet)을 두개 혹은 그 이상으로 포개어 양쪽에서 전극(electrode)으로 압력을 가하면서 접촉면(faying surface)에 순간적으로 많은 전류를 흘려 보낼 때 발생하는 열량(Joule's effect; $Q=I^2Rt$)으로 한 점 혹은 여러점에서 금속 판들을 집합시키는 것이다. 이 때 금속판 사이의 대단히 작은 접촉 저항(contact resistance)을 이용하는 것이므로 매우 큰 전류가 필요하다. 따라서 용접기(welder)내의 변압기(transformer)의 2차 측에서 전극사이에 걸리는 전압은 수 볼트(volt)이고 전류는 수 천 암페어(ampere)에 달한다. Fig.1에 전형적인 점 용접 과정이 나와 있다. 용접 시간(welding time)이 지나 전류의 흐름이 그치더라도 녹은 부위(weld metal)가 급격히 냉각되어 굳은 동안 전극의 압력은 계속 작용하고 있다.(hold time)

전극과 금속판과의 접촉 저항과 금속 자체의 고유 저항은 금속판 끼리의 접촉 저항보다 일반적으로 작다.⁽¹⁾⁽²⁾

그리고, 전극으로는 열 전도도(heat conduct-

ivity)가 큰 것을 쓰고 냉각수도 순환시킴으로써 전극과 금속 판 사이에는 발생하는 열을 분산시키고 금속 판 사이에서 발생하는 열은 집중시켜 원하는 바 금속 판 끼리의 접합을 얻을 수 있다. Fig.2에 각 부분의 접촉 저항을 표시한 그림이 나와 있다. 용접이 될 때 용융되어 녹아 붙은 곳을 nugget이라 하며 그 주위의 열의 영향을 받은 부위를 corona 혹은 heat affected zone이라 한다. 각각의 용접된 모양은 전극 표면의 크기와 모양에 따라 다르다. Nugget은 접촉면에서 형성되나 그것이 밖의 표면까지는 나오지 않으며 잘 형성된 nugget은 단면이 타원이다. 본 연구에서 쓰이는 재료인 연강에서는 nugget이 ductile pearlite end structure를 갖는다.⁽⁴⁾ 그리고 용접된 시편의 tensile-shear strength는 nugget의 크기에 비례한다.⁽¹⁾⁽⁴⁾

이 점 용접은 작업 속도가 빨라 대량 생산에 용이하며, 가열 범위가 좁아 매우 국부적인 변질에 그치며 잔류 응력이나 변형도 적어 용접부의 안정성이 크다.

또한 그 자체의 물체만으로 접합이 이루어지기 때문에 무게가 무거워지는 것이 큰 단점인 비행기나 자동차의 몸체 등에 널리 사용되어 왔다. 그러나 이 용접이 갖고 있는 큰 단점은 파괴시험 외에는 용접의 용접질(weld quality)을 알 수 있는 확실한 방법이 없다는 점, 즉 신뢰도가 떨어진다는 점이다. 또 process 자체가 대

단히 짧은 시간에 이루어지므로 자그마한 process variation에도 용접질이 크게 변할 수 있다. 이러한 process variation에 영향을 미치는 변수(parameter)로는 용접전압, 용접전류, 전극의 압력, 재질의 표면상태 및 전극의 변형상태 등이 있고 위 변수들이 수시로 변할 수 있으므로 이 process는 operation dependent이다. 따라서 이러한 문제점을 보완하고자 하는 연구들이 과거부터 있어 왔다.

초창기에는 오직 작업자(operator)의 직관과 경험으로 용접전류와 전극의 압력을 조절하였고 그 후에는 캠(cam)이나 pneumatic delay device와 같은 기계적 장치들로 용접시간을 조절하였다.

1920년대 초에 RC time constant와 supply voltage로 용접시간을 조절하는 전자적 장치가 개발되었다. 그러나 그 때까지만 해도 이 방식으로는 용접시간 제어에 오차가 있었기 때문에 1957년 경에 입력 주파수(line frequency)의 주기를 counting하는 방식이 개발되었다.⁽⁸⁾⁽⁷⁾

그런데 이 때까지는 squeeze time (preheat time), weld time (quench time), (postheat time), hold time 등의 시간만 제어하였고, 같은 시간에도 재료의 여러가지 상태에 따라 변할 수 있는 전류의 변화, 전압의 변화, 전극 압력의 변화 등은 별로 고려되지 않았다. 그 후 current regulation과 더불어 current slope control을 하고자 하였다.⁽⁸⁾ 또한 열적 저항(thermal resistance)과 전기적 저항(electrical resistance)과의 관계에서, ultimate temperature와 ambient temperature의 차이와 용접 전류와의 직접적인 관계식을 유도하여 용접전압을 일정하게 유지시켜 주고자 하는 voltage constraint control 방식이 나왔다.⁽⁹⁾ 그러나 이 방식은 그 후 ψ - ϕ theorem을 기초로 한 연구결과와 완벽하게 맞지는 않았다는 사실이 밝혀졌다.⁽¹⁰⁾

그리하여 그 외의 nugget의 형성과정을 잘 나타내 주는 process parameter를 찾게 되었는데, 그러한 변수들 중 nugget 형성부의 온도는 실제적으로 측정하기가 대단히 곤란하며 그밖의 용접중에 투입되는 energy와 용접중의 열팽창으로

야기되는 전극의 분리현상(electrode separation or electrode movement), 그리고 용접 중에 변하는 전기 동 저항(dynamic resistance)이 주목받게 되었다. 그 중 전기 동 저항은 1960년대 이후 여러 사람들에 의해 연구되어 거의 완벽한 monitoring signal로 정착되었는데, 그 연구결과에 따르면 전기 동 저항의 모양은 용접전류가 작을 때에는 peak가 발생하지 않다가 어느 정도 용접전류가 증가하면 peak가 발생하고 일단 peak가 발생한 후에는 용접전류가 증가함에 따라 peak의 발생시기가 당겨지며 peak 이후에 떨어지는 저항값(ΔR)은 증가한다고 한다.⁽³⁾⁽⁶⁾⁽¹⁰⁾⁽¹¹⁾⁽¹²⁾

용접공정의 특성은 process 자체의 여러 변수들과 복잡하게 연관되어 있는(interrelated) thermo-physical한 특성때문에 이론적인 모델을 설정하기가 대단히 힘들다. 따라서 본 연구에서는 input인 power와 output인 동 저항만을 이용하여 black-box approach로 reference 동 저항 곡선이 갖는 용접질과 on-line으로 측정되어 제어되는 용접질이 같아지도록 input power를 S-CR로 제어한다. 이 때 제어 algorithm은 PI-control algorithm을 사용한다.

2. 점 용접의 이론적 배경

점용접과정을 Fig. 1에 도시하였는데 용접되는 과정을 살펴 보면 다음과 같다. 두 금속판을 접촉시켰을 때 접촉사항은 두판의 저항(bulk resistance)보다 매우 크다. 두판에 힘을 가하여 판 사이에 전압을 걸면 접촉면의 요철상태가 소성변형을 일으켜, 접촉면의 산화물의 피막이 파괴되며 전류가 흐르기 시작한다. 이때 접촉 저항이 크므로 열이 발생하여($H = i^2 R t$: joule heating)용융점에 도달하면 용융이 시작된다. 이와같은 원리로 접촉점부터 용융이 일어나서 nugget이 형성될 때까지 electrode로 힘을 가하여 눌러주면 두판이 용접된다. 이 용접 과정에서 생기는 용접전류와 전압을 측정하여 dynamic resistance을 구하면 Fig. 3에 보인바와 같다. Fig. 2에 용접재와 용접사이의 저항을 표시하였다.

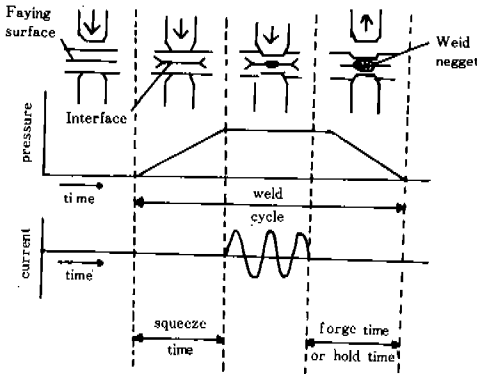
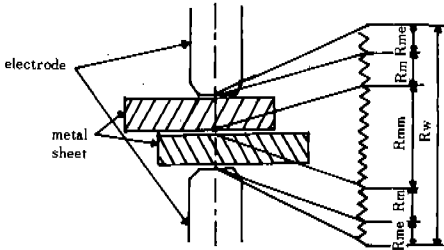


Fig. 1. Relationship between weld formation, current and pressure in resistance spot welding.



R_{me} : Contact resistance of electrode-workpiece
 R_m : Bulk resistance
 R_{mm} : Contact resistance of metal-to-metal

Fig. 2. Welding Resistance.

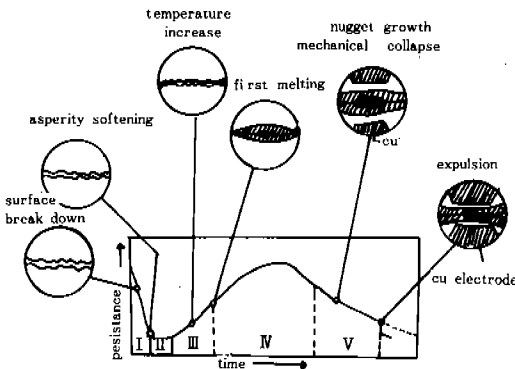


Fig. 3. Theoretical dynamic resistance curve.

(1) 구간 I

Electrode force에 의해 파괴되기 전까지는 용접재의 접촉점의 표면산화막 때문에 절연 저항이 수 메가-옴(mega ohm) 정도로 나타나기 때문에 전류가 거의 흐르지 않는다. 절연상태가 파괴됨에 따라 전류가 흐르기 시작하여 접촉면에서 온도가 상승하면 산화물의 피막이 급격히 파괴되어 매우 빠른 전기동저항의 감소현상이 나타난다.

(2) 구간 II

온도가 상승함에 따라 접촉면의 연성이 증가하므로 접촉면적이 증가하여 저항이 감소되나 온도 상승에 의한 용접재의 resistivity가 증가하여 서로 상반된 효과를 나타내어 이러한 효과가 평형상태를 이루는 점이 α 점의 최소 값으로 나타난다. 온도상승에 의한 저항의 증가효과가 접촉면적의 증가에 의한 저항의 감소효과를 상쇄시키면서 dynamic resistance는 증가하기 시작한다.

(3) 구간 III

Dynamic resistance는 온도 상승에 의하여 계속 상승하다가 구간III이 끝나는 점에서 workpiece의 접촉점의 부분적 용융이 일어난다. 구간 IV로의 천이점은 inflection point ($d^2 R/dt^2 = 0$; 변곡점)근방에서 일어난다.

(4) 구간 IV

여기서는 세가지 현상이 일어난다. 전체 workpiece의 온도는 계속 상승하여 resistivity를 증가시켜 dynamic resistance도 증가한다. 계속 발생하는 열 때문에 접촉표면에서 용융된 부분(nugget 형성부)이 증가하여 전류가 흐르는 단면적을 증가시키기 때문에 저항이 감소한다. 이와 동시에 온도 상승에 의한 접촉면의 연성이 증가하여 접촉면적이 증가하여 전류가 흐르는 경로를 짧게 해주어 역시 저항도 감소한다.

β 의 최대점은 온도가 안정되기 시작하는 점이며 nugget 형성부가 점차 커지고 workpiece의 접촉면이 계속 넓어지면서 전기동저항은 감소하기 시작한다.

(5) 구간 V

β 의 최대점을 넘어서는 nugget 형성부가 계속

커지고 workpiece 접촉면이 계속 넓어지기 때문에 dynamic resistance는 감소한다. nugget 형성부가 커져서 주위의 고체 상태인 workpiece가 electrode force를 더 이상 지탱하지 못할 때에는 expulsion이 일어나서 dynamic resistance가 급격히 감소한다.

3. 제어 실험

앞에서 설명한 바와 같이 dynamic resistance에 따라 용접 강도가 변하기 때문에 이러한 dynamic resistance의 형상을 출력변수로 보아 용접기에 들어가는 전기 전력을 제어함으로써 원하고자 하는 전기동저항(DR)에 접근시키는 것이 본 실험의 목적이다.

Fig. 4에 본 제어 시스템의 block diagram을 나타내었다. 여기서 \bar{R}_{dyn} 은 원하는 형상의 전기동저항을 나타내고 controller는 PET μ -computer에 프로그램된 discrete 제어를 나타내며 SCR driver는 용접기에 들어가는 전력을 제어해주는 장치이고 R_{dyn} 은 용접 도중에 측정되어 나오는 전기 동 저항(DR)을 표시하고 있다. 전체 제어 시스템의 실험과정 및 원리를 보면 다음과 같다.

(1) 원하고자 하는 형상의 \bar{R}_{dyn} 을 어떤 용접 조건에서 측정하여 A/D 변환기로 sampling하며 PET μ -computer에 입력시킨다.

(2) 용접 공정의 특성에 알맞는 제어기(여기서는 Proportional controller를 사용했음)를 프로그램하여 내장한다. 실제 용접중의 제어 실험은 다음 과정을 거치는 데

(3) 실제로 측정하여 나온 R_{dyn} 의 전기 시그널을 원하는 \bar{R}_{dyn} 과 컴퓨터안에서 순간 순간 비교되어 오차에 비례하는 discrete한 전기 시

그널을 만들어 낸다.

(4) 이 시그널은 digital 형태이기 때문에 D/A 변환기를 통하여 analog 형태의 시그널로 전환시켜서 SCR driver로 보낸다.

(5) SCR driver는 이 제어 시그널을 받아서 용접기에 들어가는 전력을 제어하게 된다.

(6) 제어 시그널에 의해 제어된 전기 동저항(R_{dyn})이 측정되어 나온다.

(7) 이러한 제어과정을 전 용접과정 동안 되풀이 한다.

1) 실험장치

실험에 사용한 용접기로는 영국계 Meritus사의 제품이다(Fig. 5 참조). 전기동저항(DR)의 측정에서 부터 PET와의 interface, 용접기의 전력제어를 위한 SCR driver, 전력제어에 의한 새로운 전기저항의 변화에 이르는 전체 용접과정의 계측 및 제어과정을 좀더 자세히 Fig. 6에 도시하였다. 각 구성 부품의 기능을 간단히 설명해 보기로 한다.

(1) 용접 전압측정

용접과정 중의 전압(V)는 용접중 전극(electrode)의 양단간에 걸리는 전압을 직접 differential amplifier(Fig. 5 참조)를 사용하여 측정하며 full-wave 정류기를 통하여 정류하였다. 정류된후의 전압 파형을 Fig. 7에 나타내었다.

(2) 용접 전류 측정

용접 전류(1)는 6,000A - 12,000A 정도나 되는 고전류이기 때문에 측정하기 곤란하므로 전극 주위에 링 모양의 troid(Fig. 5 참조)를 설치하여 이에 유도되는 electromotive force로 용접전류를 간접적으로 측정했다. 이와 같이 측정된 전류는 전압(V)와 위상차가 90°가 나기 때문에 Miller T 적분 회로를 통과시켜 위상을 90°

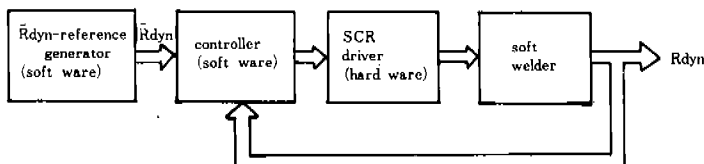


Fig. 4. Schematic diagram of dynamic resistance tracking system.

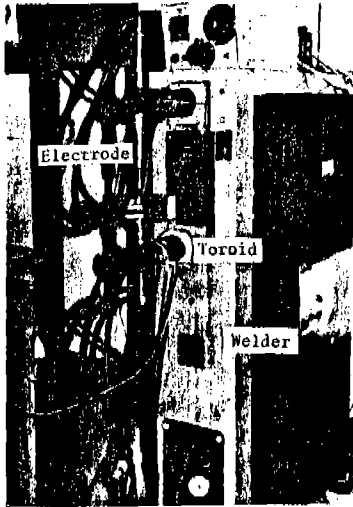


Fig. 5. Instrumented Spot Welder.

변화시켰다. 위상이 변화된 시그널을 일단 정류시키면 V와 I의 파형의 위상이 정확히 일치하지 않으므로 phase-shifting 회로를 사용하여 전류 시그널 I를 전압(V) 파형에 정확히 일치시켰다.

(3) 전기동저항(DR) 측정

이상과 같이 얻어진 전압과 전류를 analog divider를 통과시키면 $R_{dyn} = \frac{V}{I}$ 에 의해서 전기동저항을 구할 수 있는데 이 시그널에는 60Hz component가 실려있기 때문에 filter 주파수가 10Hz인 low pass filter를 통하여 filter시켰다.

(4) PET μ -computer interfacing

10Hz filter를 통과한 R_{dyn} 은 analog시그널이기 때문에 μ -computer에 입력시키거나 com-

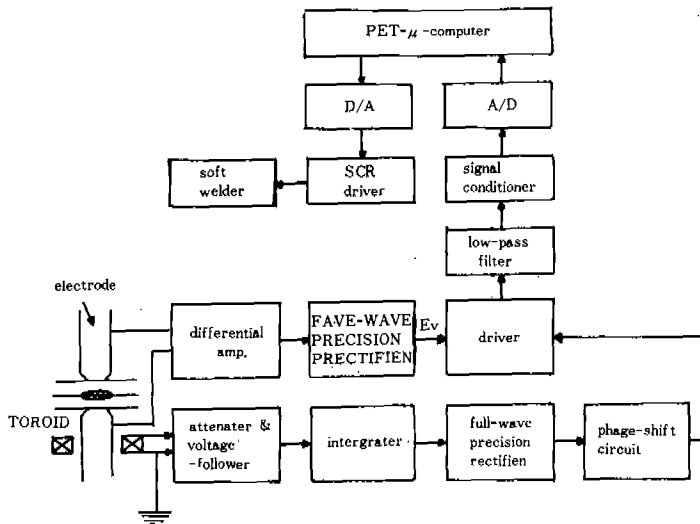


Fig. 6. Signal Processing unit and control system

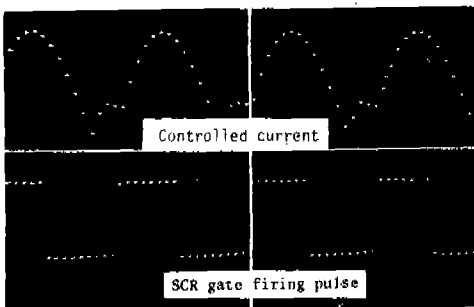


Fig. 7. Controll weld current.

puter에서 계산된 출력을 외부장치 SCR driver에 analog signal을 보내주기 위해서는 I/O port를 통한 입출력 신호의 교환이 필요하다. A/D 변환기에 의한 R_{dyn} 의 Sampling에서 D/A를 통하여 제어 시그널을 컴퓨터에서 내보내기까지의 전과정을 기술하기로 한다.

본 실험에서 사용한 μ -computer는 PET2001 servies이며 memory, screen, 입력 및 출력을 제어하는 μ -processor로서 MCS 6502를 사용

하였다. 계산속도를 결정해 주는 시스템 internal clock 으로는 1MHz를 갖고 있으며 32K의 RAM 및 32K의 ROM을 지니고 있다. 보조 기억장치로는 cassette나 dual floppy disc driver가 이용되어 수시로 데이터를 기억시킬 수 있게 되어 있다.

I/O Interface

Analog형태의 전기 동저항 신호가 A/D에 의해서 sampling되어 나온 신호를 I/O port를 통해서 μ -processor가 받아 들이고 또한 제어기 (software)에 의해 계산된 digitized된 제어신호를 역시 I/O port를 통해서 D/A변환기로 보내는 역할을 담당하는 것이 I/O interface port이다.

PET μ -computer (2001 series)에는 user가 사용할 수 있는 I/O port가 2개만이 있기 때문에 입력 및 출력 신호를 동시에 받아 들이고 내 보낼 수가 없다. 따라서 적절한 data bus의 제어에 의해서 data를 받아 들이거나 혹은 data를 내보내는 역할을 관장하는 기능이 필요하다.

Fig. 8은 데이터의 입력 및 출력의 data line을 결정지워 주는 bi-directional data bus control과 데이터를 컴퓨터로 받아 들이고 컴퓨터에서 외부로 내보내는 I/O port를 나타낸 회로이다.

이 실험에서 데이터의 입출력 상태를 결정지워 주게끔 사용된 IEEE-488 port의 connector 배열을 보면 8개의 bi-directional data line (D101-B108 : Pin 1234, ABCD.) IEEE 488 device 사이의 data를 제어할 하는 handshaking management group (pin 5-12)과 나머지는 ground로 구성

되어 있다. 8개 pin의 data line들은 입력 혹은 출력상태로 선정하여 사용할 수 있으며 handshaking이 불필요한 device를 연결할 때에는 이 pin들을 유용하게 사용할 수 있다. data line을 제어하는 register들을 address를 가진 memory로 취급된다. 여기서 IEEE-488 Interface port의 역할을 보면

- 1) data line (D101-D108)을 통하여 analog port channel의 선택 enable, start, stobe등의 제어 신호를 내보내며
- 2) Handshaking pin (pin 번호 7)의 NFRD(not ready for data)를 이용하여 high상태일 때는 D/A 변환기를 통하여 출력신호를 holding시키면서 A/D 변환기에 의해 변환된 입력신호를 받아 들일 수 있게 한다. 반대로 NFRD가 low인 상태일 때는 A/D 변환기와의 연결을 끊고 D/A 변환기와의 통로를 열어 D/A 변환이 이루어 지도록 한다.

Parallel user port (I/O 6522)는 모양과 기능면에서 IEEE-488 port와 비슷하다. 이 port는 24개의 pin이 있으나 아래면의 8개의 pin (PA0-PA7)을 data line으로 사용하고 address 59459 (HEXA, \$ E843)의 PADDR(port A data direction register)에 있는 bit상태에 따라 입력 및 출력 상태가 결정되어 user port의 data line을 통하여 데이터가 받아 들여지고 또는 데이터가 D/A 변환기로 내보내진다. 이 데이터 register의 address는 59471 Hexa \$ E84F)로 지정되어 있다.

데이터의 입출력 제어과정

Fig. 8에 나타낸 바와 같이 IEEE-488 port에 있는 handshaking pin중 NFRD bit를 사용하여 만약 high상태("1"의 logic 상태)가 Tri-state buffer 74126에 가해지게 되면 A/D conversion이 되어 data가 parallel user port를 통해서 μ -computer로 입력 된다. 이때 Multiplexer의 channel 선택 및 enable, start 등의 제어신호는 IEEE-488 port의 D101-D108 bit의 상태에 따라 결정된다. 반대로 tri-state buffer 74125가 high상태로 되면 parallel user port의 데이터가 D/A 변환기에 들어가서 analog 형태의 출력 시그널로

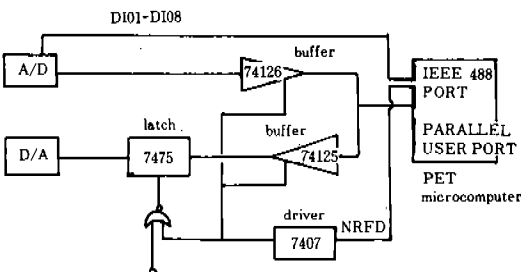


Fig. 8. Bi-directional Data Bus Control circuit.

변환되어 구동장치로 들어가게 된다. 여기서 latch 7475의 역할은 data를 holding하는 일을 한다.

A/D converter

본 실험에서는 PETSET 1(Connecticut Micro-computer Inc. 제품)의 AIM 16 (PETMOD)를 사용하였다. 이 실험에서는 전기 동저항(Rdyn) 한개의 시그널만 sampling하기 때문에 16개의 channel 중 channel "0"만 사용하였다.

D/A converter

D/A 변환기로는 LM1408을 사용하였다.

(5) 제어 시그널의 결정

앞에서 언급했듯이 이미 sampling하여 PET μ -computer에 저장시킨 reference dynamic resistance(얼고자 하는 전기 동저항의 형상)과 실제 on-line으로 측정되어, sampling되는 Rdyn 값과의 차이, 즉 오차에 비례하는 시그널을 SCR driver에 보내줌으로써 결과적으로 spot welder에 들어가는 전압(혹은 전류)을 조절하는 방식의 제어를 설계하였다. 즉 SCR driver의 입력 전압은

$$U(k) = k_p e(k) + k_i \sum_{i=0}^k e(i) + U_0$$

여기서 U_0 : 정상동작 상태의 SCR driver voltage

$\bar{R}_{dyn}(k)$: k번째 sampling 상태의 reference 전기동 저항 값

$R_{dyn}(k)$: k번째 sampling된 전기동 저항(DR)의 측정 시그널

$e(k) = R_{dyn}(k) - \bar{R}_{dyn}(k)$: 오차변수를 나타낸다. 여기서 볼 수 있듯이 비례 제어상수 k_p 와 k_i 의 값에 따라 얼마나 잘 원하는 형상에 tracking하느냐가 결정되므로 본 실험에서는 k_p 및 k_i 를 여러 값으로 변화시켜서 그 영향을 조사하였다.

(6) SCR driver의 전압제어

PET-computer가 control low에 의해 제산을

수행한 후 제어시그널을 D/A 변환기를 통해 SCR driver(Fig.6 참조)에 보내주면 이 driver는 점용접기에게 시그널에 비례하는 전압을 공급하게 된다.

이때 제어 시그널은 0 - 5V 사이로 변하게 된다. 본 실험에 적합한 SCR driver를 제작하였는데 회로의 동작 원리를 간단히 설명하면 제어 시그널의 크기에 반비례하는 SCR trigger pulse를 발생시켜서 welder에 걸리는 전압을 조절하게 되어 있다(Fig.7 참조).

4. 실험결과

참고문헌 (16)에서 보였듯이 단순한 비례제어기(P control)보다는 비례적분제어기(PI control)가 동저항곡선을 tracking하는 데 훨씬 더 효과적이라는 사실이 밝혀졌으므로 여기서는 PI control한 결과만을 언급하기로 한다. 실험한 조건은 다음과 같다.

SCR제어기의 입력(U_0) = 3.0 v

용접시간 = 16 cycle

전극의 가압력 = 300 kgf

시편의 재질 = 냉간압연 연강판

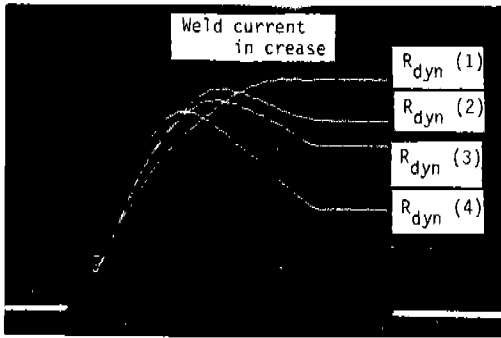
시편의 두께 = 1.6 mm

squeeze 시간 = 30c cycle

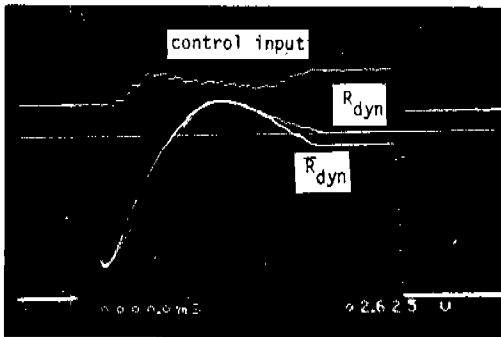
hold 시간 = 30 cycle

Fig. 9(a)는 용접조건이 다름에 동저항곡선이 어떻게 변화하는가를 보여준다. 여기서 용접조건은 단지 용접전류를 계속 증가시켰으며 Rdyn(1)은 전류를 제일 적게 흘렸을 때를 나타내는데 곡선상의 peak점을 찾아볼 수 없는 반면에 전류를 증가시킬 때 동저항곡선의 peak점이 오른쪽으로 이동하면서 곡선자체가 점점 낮아지는 현상을 나타낸다. 이러한 결과는 다른 연구자들이 연구한 결과와 일치한다. Fig. 9. (b)에서는 PI제어를 했을 때 제어된 동저항곡선과 원하고자하는 동저항 곡선과를 비교했으며 아울러 SCR에 입력되는 제어전압을 나타내고 있다. 여기서 제어기기 gain은 $k_p = 1$ 과 $k_i = \frac{1}{16}$ 을 사용했다.

두곡선이 완전히 일치하는 하지 않으나 아주 근사하게 따라감을 알 수 있고 이러한 tracking하



9 (a) Dynamic resistance at various welding currents



9 (b) Controlled dynamic resistance (R_{dyn}) v. s. reference dynamic resistance (R_{dyn})

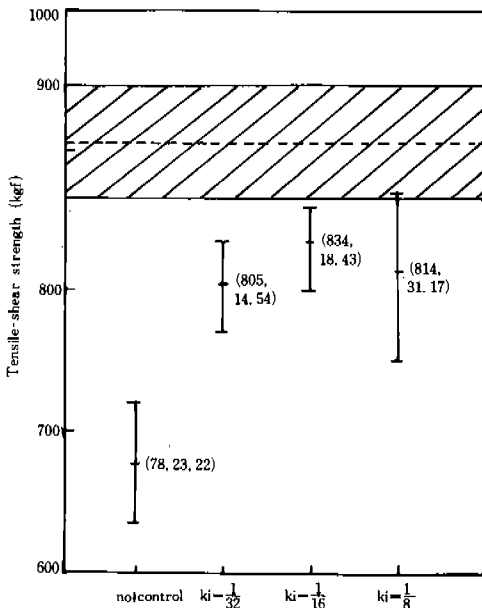


Fig. 10 Strength v. s. Controller Gain

는 성능은 적분기의 gain k_i 에 따라 다소 차이가 있음이 확인되었다. Fig. 10은 원하는 용접상태의 조건과는 다른 용접조건으로 놓고 k_i 의 gain을 바꿔가면서 제어했을 때의 용접강도를 나타낸 그림이다.

여기서 제어기 k_i 의 gain은 $\frac{1}{32}, \frac{1}{16}, \frac{1}{8}$ 로 변화시켰으며 각 실험마다 15번 용접하여 얻은 시편을 재료시험기를 사용하여 tensile-shear 강도시험을 시행하였다. 그림에서 막대기로 표시한 부분은 각 용접조건에서 얻어진 용접강도의 범위를 나타내고 점으로 표시된 부분은 그때의 평균강도와 표준편차를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 원하고자 하는 용접편차 강도는 905kgf인데 비해 제어하지 않는 경우의 용도 평균강도는 678kgf로서 많은 차이를 나타낸다. 그러나 제어하는 경우의 평균강도는 원하는 용접 평균강도와 많이 근접하여 $ki = \frac{1}{32}$ 인 경우 805kgf, $ki = \frac{1}{16}$ 인 경우 834kgf, $ki = \frac{1}{8}$ 인 경우 814kgf로 나타난다. 이는 k_i 의 gain이 증가하면 평균용접강도는 원하는 용접강도에 가까워진다는 것을 의미해서 결국 동저항곡선을 이용하여 제어하면 원하는 강도에 가까운 강도를 얻을 수 있다는 사실이 확인된 셈이다.

5. 결 론

전기 동저항 제어실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 점용접 과정에서 동저항이 용접철(용접강도)을 잘 나타내 준다.
 - ① 동저항 곡선의 peak가 발생하는 시간이 이르면 일반적으로 늦게 나타난 것보다 용접질이 좋다 (단, expulsion이 발생하지 않을 때까지).
 - ② peak에서의 저항값과 용접시간 끝에서의 저항값 차이가 클수록 일반적으로 용접질이 좋다.
- (2) 한 동저항곡선에 다른 동저항곡선을 맞추려는 제어를 할 때는 다음과 같은 관계가 있다.
 - ① P-control로는 동저항을 추적하는 효과를

충분히 얻을 수 없고 적분제어기를 추가한 PI-control을 하면 잘 추적한다.

- ② 용접질의 관점으로 볼 때 원하는 용접강도를 얻으려고 PI제어를 하면 그 용접 평균 강도에 아주 근사한 강도를 얻을 수 있다.

REFERENCES

1. R. W. Humpage et, al, "Formulae for Obtaining Optimum Settings for the Spot Welding of Clean Mild Steel", *Welding*, Dec. 1950, pp. 515~522
2. W. F. Savage et al, "Static Contact Resistance of Series Spot Welds," *Welding Research Supplement*, Nov. 1977, pp. 365-s ~ 370-s
3. W. F. Savage et al, "Dynamic Contact Resistance of Series Spot Welds," *Welding Research Supplement*, Feb. 1978, pp. 43-s~50-s
4. I. W. Johnson, "Spot Welding of Carbon Steel," *Welding Research Supplement*, Mar. 1960, pp. 89-s~96-s
5. W. L. Roberts, "Resistance Variations During Spot Welding," *The Welding Journal*, Nov. 1951, pp. 1004~1019
6. W. J. Farrel, J. L. Solomon, "A New Concept for Control of Resistance-Welding Machines," *Welding Journal*, Apr. 1957, pp. 356~362
7. J. L. Solomom, M. Balikov, "New Techniques in Precision-Welding Control," *The Welding Journal*, Jan. 1958, pp. 16~21
8. C. Sinclair, F. S. Parker, "Regulated and Programmed Resistance-Welding Control System," *The Welding Journal*, May. 1957, pp. 463~465
9. G. R. Archer, "A New System for Automatic Feedback Control of Resistance Spot Welding," *Welding Journal*, Oct. 1959, pp. 987~993
10. S. Battacharya, D. R. Andrews, "Significance of Dynamic Resistance Curves in the Theory and Practice of Spot Welding," *Welding and Metal Fabrication*, Sep. 1974, pp. 296~301
11. M. Towey, D. R. Andrews, "Instantaneous Resistance during Spot Weld Formation as a Parameter for an Automatic Control System," *Welding and Metal Fabrication*, Oct. 1968, pp. 383~392
12. D. W. Dickinson et al, "Characterization of Spot Welding Behavior by Dynamic Electrical Parameter Monitoring," *Welding Research Supplement*, Jun. 1980, pp. 170-s~176-s
13. P. M. Knowlson, "Instrumentation for Resistance Welding," *British Welding Journal*, Apr. 1965, pp. 167~190
14. H. S. Chang, "Microcomputer Application to the Control of Dynamic Resistance During Resistance Spot Welding Process," M. S. Thesis, Dpt. of Mechanical Science, KAIST, 1982
15. K. N. Song, "Effects of Welding Process Variables on Qualities of Resistance Spot Welding," M. S. Thesis, Dpt. of Mechanical Science, KAIST, 1982
16. Y. J. Won, H. S. Cho, and C. W. Lee, "A Microprocessor-based Control System for Resistance Spot Welding processes," 1983 American Control Conference, San Francisco, California, U. S. A., pp. 734~739, 1983