

아크 용접 로봇트 제어기

김성권, 김동일, 황찬영, 윤명균*
삼성전자 생산기술센터 자동화연구소

Arc Welding Robot Controller

Sung Kwun Kim, Dong Il Kim, Chan Young Hwang and Myoung Kyun Yun*
Samsung Electronics, Production Engineering Center, FA Research Institute

ABSTRACT

In this paper, the arc welding robot controller using a touch sensor and a arc sensor is presented. The controller is composed of robot controller parts for moving torch, and arc welding controller for welding and tracking.

In the controller, an compensated data is generated to control robot trajectory and seam tracing by the arc sensor function. The data is obtained by integration of arc current. Experimental results are presented confirming the controller performance.

1. 서론

최근 로봇트의 응용기술이 발달하면서 각종 산업 분야의 적용이 확대되었고 특히 작업의 분업화로 인한 반복작업의 증대와 분진이나 소음으로 그 작업 환경이 열악한 곳에 산업용 로봇트의 적용이 가속화 되었다. 또한 품질 및 생산성을 향상 시키기 위하여 로봇트의 적용이 더욱 중요하게 되었다. 용접작업에 있어서도 고품질, 고신뢰성을 위하여 산업용 로봇트의 적용이 확대되었고 그 연구가 활발히 진행되고 있다.

용접용 로봇트 제어기술은 안정된 용접 자세를 얻기 위한 로봇트 자세 제어 기술과 용접 품질을 높이기 위한 용접 파라미터의 제어 기술로 분류할 수 있다.

본 연구에서 언급되는 용접법은 GMAW (Gas Metal Arc Welding)로 그 용접 속도가 약10(mm/s)이며 로봇트의 작업 속도로는 비교적 느린 작업 속도를 가진다. 그러므로 용접용 로봇트의 자세제어 알고리즘은 직선(CP) 구간에서의 정속도 특성과 저속 특성이 우수하도록 설계되었다. 또한 용접시 발생하는 열적 변형이나 모재의 불어짐을 보정하기 위한 용접신 보정 알고리즘을 적용하였다.

제어기는 로봇트의 자세 제어부분과 용접 제어부분으로 구성되며 각 제어부분은 독립된 마이크로 프로세서에서 의하여 제어되도록 구성되었다.

2. 가스 금속 아크 용접 (GMAW)

GMAW 용접법은 용접 보호가스의 분위기 에서 나신의 용가제 용접봉과 모재 사이에서 발생한 아크 열을 이용하여 용접봉의 끝을 녹이고 모재 표면이 응착 금속으로 형성되는 용접법이다. 이때 발생된 아크는 그 특성이 아크 전압과 전류, 용극 및 양극의 재료, 크기, 온도 그리고 보호 가스의 종류와 아크 길이에 관계가 된다. GMAW에서는 GTAW (Gas Tungsten Arc Welding)와는 달리 용융된 용가제의 용접봉이 모재로 이송하게 되므로 아크 전압과 전류의 특성이 용접 특성에 큰 영향을 미친다.^[1]

GMAW에서 용융금속의 이행방법은 구형이송 (Globular Transfer), 분무이송 (Spray Transfer), 맥뚝 아크 이송 (Pulsed Arc Transfer)으로 나뉘어 지며 이와 같은 이송의 형태는 전압과 전류의 관계에 의하여 변경되어 진다.^[2]

용접 재료, 보호 가스, 용접봉의 이행방법등 용접환경의 변화가 용접 특성의 변화에 크게 작용하지만 실제로 아크 전류의 변화가 용융금속의 이행과 관계가 깊어 용접 전류의 형태를 변화 시킴으로써 용접 특성을 제어하거나^{[3][4]} 스패터를 줄이는 방법^[5]이 연구 되었다. 그러므로 용접중 변화되는 용접 환경, 아크 전압과 전류를 분석하면 용접후 용접의 결과에 대하여 예측할 수 있게 된다.^[6]

그림 1에서 단락 아크 용접법에 의한 용접시 아크 전류와 용상의 이행관계를 나타내었고 그림 2에 필스 아크 용접법에 의한 용접시 아크 전류와 용상의 이행관계를 나타내었다.

3. 운 병 법

운병법에는 용접을 개시하면서 용접을 마치기 까지 용접선을 따라 용접봉을 이송하는 것을 말한다. 운병법의 종류에

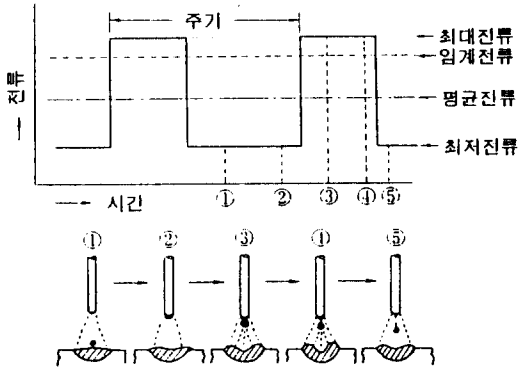


그림 1. 단락 아크 용접법
Fig. 1. Shorted arc welding method.

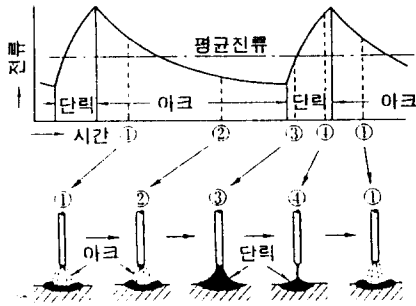
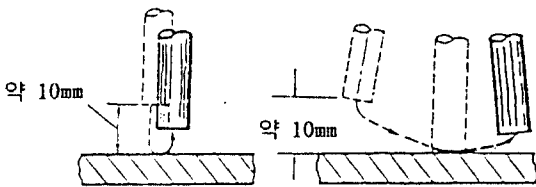


그림 2. 펄스 아크 용접법
Fig. 2. Pulsed arc welding method.

따라서 용접의 특성도 각기 다르게 나타난다. 그러므로 운봉법은 로봇의 자세를 제어하는 방법을 제시하게 되고, 안정된 로봇의 자세가 좋은 특성의 용접을 실시할 수 있게 된다.

아크 용접 개시점에서의 운봉법으로 귀환법, 터치 스타트법 그리고 스크래치 스타트법등이 있으며 이들 용접개시 방법에 대하여 그림 3에 나타 내었다.



(1) 터치 스타트법 (2) 스크래치 스타트법
그림 3. 용접 개시 방법
Fig. 3. Welding starting process.

용접을 마감할때 크레이터를 처리하기 위하여 특수한 운봉법을 수행하게 되며, 크레이터 처리를 위하여 용접 마감점에서 전압과 전류를 변경하여 제어 하게 된다. 용접중 용접면의 크기와 길이, 혹은 비이드의 크기를 조절하기 위하여 운봉법을 달리 하는데 이러한 운봉법을 위빙(Weaving)이라 한다.

그림 4에 위빙에 의한 용접마감시 크레이터 처리방법을 나타내었다.



그림 4. 크레이터 처리방법
Fig. 4. Crater treatment method.

4. 용접 로봇 제어기

용접제어기는 용접 전압과 전류를 제어하기 위한 아나로그 입출력 채널을 가지고 있으며, 용접의 주변 환경을 제어하기위한 접점제어 신호들을 가지고 있다. 용접기능의 제어만을 담당하는 전용의 마이크로 프로세서에 의하여 제어가 이루어지며, 전압과 전류 각각 독립된 2개의 제어루프에 의하여 제어된다.

용접을 위한 용접 제어기의 기능은 표1에 나타내었고 제작된 용접 로봇 시스템의 주요 제원은 표2에 나타내었다.

표 1. 기능 사양

항 목	사 양
용접 방법	CO ₂ Arc 용접
용접 알람기능	아크 끊김 가스부족 와이어 부족 냉각수 부족 응착 발생 용접기 이상 발생
Weaving 기능	단진동 위빙 사용자 정의 위빙 진자형 위빙
용접 특수 기능	아크 센서 기능 터치 센서 기능

용접용 로봇 제어기는 로봇의 자세를 제어하는 JPC(Joint Position Controller)와 용접을 제어하는 WDC(Welding Controller), 그리고 위의 제어기들을 중재하고 사용자 인터페이스를 담당하는 주제어기로 구성되어 있다. 용접용 로봇 제어기의 구성도를 그림 5에 나타내었다.

표 2. 용접 시스템 주요 제원

항 목	제 원
구 조	수직 다관절형
제어 축수	6 축 (8 축)
위치 반복 정밀도	0.05 [mm]
합성 최대 속도	2000 [mm/s]
가반 중량	3.0 [Kg]
용접기 용량	350 [A]
와이어 직경	1.2 [φ]
보호 가스	CO ₂

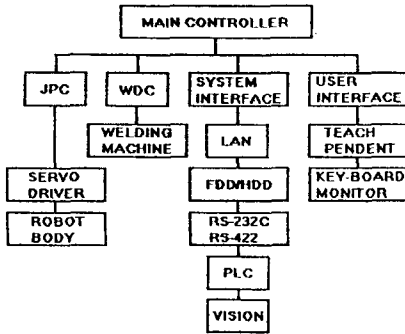


그림 5. 용접용 로봇 제어기의 구성도
Fig. 5. Welding robot controller configuration.

5. 로봇 자세제어

로봇의 자세제어를 담당하고 있는 JPC는 고정도 위치 제어를 위하여 Feed Forward 제어 루프를 PID 제어 루프에 추가하였으며, 고속의 연산을 위하여 DSP를 탑재하고 있다. 또한 안정된 로봇의 자세를 확보하고 유지보수에 유리한 교류서보모터를 채용하여 고정도 제어를 실현하였다.

용접 경로의 추적은 사용자 프로그램에 의하여 미리 고시되어진 경로를 이동하게 되고 워빙이나 아크센서등과 같은 특수한 기능을 사용하지 않을 경우 로봇의 경로는 고시된 경로와 일치하게 된다.

위치제어 루프의 블럭선도를 그림 6에 나타내었다.

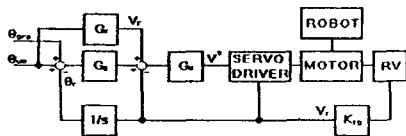


그림 6. 위치제어 블럭도
Fig. 6. Position control block diagram.

그림 6에 나타난 제어루프는 위치제어 루프에 Feed Forward 루프를 가지고 있으며 다음과 같다.

$$\theta^* = G_\theta \cdot (\theta_{cmd} - \theta_r + \theta_{arc}) \quad (1)$$

$$G_\theta = (K_{\theta 0} + K_{\theta 0} s + K_{\theta 1} / s) \quad (2)$$

$$V^* = G_v \cdot (\theta^* + V_f - V_r) \quad (3)$$

$$V_f = G_f \cdot \theta_{cmd} \quad (4)$$

$$G_v = (K_{v 0} + K_{v 0} s + K_{v 1} / s) \quad (5)$$

$$G_f = (K_{f 1} s^2 + K_{f 2} s) \quad (6)$$

여기서, G_θ, G_v, G_f는 PID이득을 가지며 각각 제한기를 가지고 있다. 보상 위치값 θ_{arc}는 아크 센서의 위치보상 제어 루프에 의한 보상값이 되므로 아크 센서의 동작시만 그 값이 존재하며 아크 센서의 비동작구간에서는 그 값이 항상 영(0)으로 존재한다. K_{θ0}는 위치 검출기, 레졸버로부터 변환 상수이다.

터치 센서를 위한 특수동작은 그림 5의 제어 루프에서 θ_{cmd}의 값을 미소량으로 조절하여 용접 토치, 즉 tool의 접근 방향으로부터 45°방향으로 접근 하여 용접위치를 보정하도록 설계되어 있다.

6. 용접 제어

로봇용 용접의 제어대상은 로봇 자체제어를 통한 운동법의 제어와 아크의 특성을 제어하기 위한 용접 전압과 전류의 제어이다. 그밖의 용접 파라미터들은 로봇 제어기에서 제어할 하지 않는다.

따라서 용접 제어기에서 직접 제어할 수 있는 제어대상은 아크 전압과 전류이며 용접기로부터 되먹임되는 되먹임 전압과 전류로부터 로봇 자체제어를 위한 자세 보정 데이터를 생성한다.

용접 제어기내의 제어루프는 전압과 전류의 독립적인 PID 제어루프가 구성이 되어 있고, 자세 보정량을 산출하는 제어루프는 사용자에 의하여 미리 지정된 파라미터 값에 따라 Open-Loop로 형성이 되어 아크 센서기능의 동작시 자세제어기(JPC)로 전달이 된다. 용접 제어를 위한 제어블럭도를 그림 7에 나타내었다.

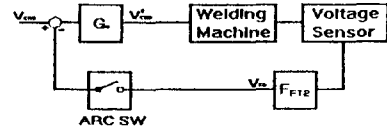
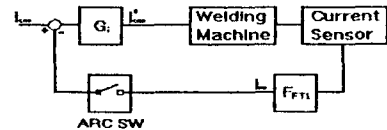


그림 7. 용접 제어 블럭도
Fig. 7. Welding control block diagram.

그림 7에서 아크 전류와 아크 전압의 제어 루프는 서로 독립적이고 아크 센서 스위치에 의하여 되먹임 제어 되며 다음과 같다.

$$i_{00}^* = G_i(i_{00} - i_{FB}) \quad [\text{ARC SENSOR OFF}] \quad (7)$$

$$i_{00}^* = G_i i_{00} \quad [\text{ARC SENSOR ON}] \quad (8)$$

$$G_i = (K_{P_i} + K_{D_i}s + K_{I_i}/s) \quad (9)$$

$$v_{00}^* = G_v(v_{00} - v_{FB}) \quad [\text{ARC SENSOR OFF}] \quad (10)$$

$$v_{00}^* = G_v v_{00} \quad [\text{ARC SENSOR ON}] \quad (11)$$

$$G_v = (K_{P_v} + K_{D_v}s + K_{I_v}/s) \quad (12)$$

여기서 G_i , G_v 는 PID 이득이며 각각 전류, 전압 제한기를 가지고 있다. F_{FB1} 와 F_{FB2} 는 저역 필터로 구성되어 있다.

그리고 그림 8에 용접을 제어하는 프로그램의 용접 시퀀스에 대하여 나타내었다.

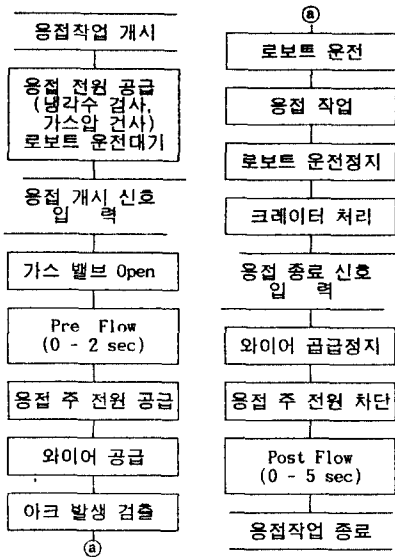


그림 8. 용접 제어의 순서도
Fig. 8. Welding control sequence.

7. 터치 센서 기능

터치센서(Touch Sensor)는 용접기동시 사용하는 위치 보정용 센서기능으로 용접 개시점에서 고시된 위치와 모재의 고정시 발생한 오차를 검출하여 위치 오차를 보정하여 주는 기능이다. 용접 개시점에서는 아크 센서를 등작시키지 못하게 되므로 용접 아크의 안정화 시간이 지난후 위치예러를 보정할 수 있게 된다. 그러므로 터치센서는 용접 개시점에서 발생한 위치 예러를 용접개시 이전에 보정하여 주는 기능이다. 필렛 용접에서의 와이어 터치 센서의 원리를 그림 9에 나타내었다.

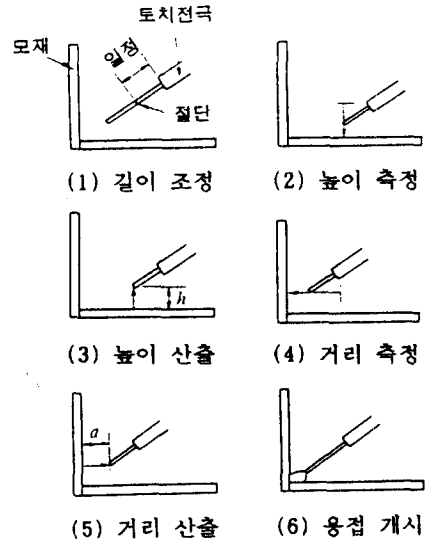


그림 9. 터치 센서의 원리
Fig. 9. Principle of touch sensor.

그림 9의 (1)에서 와이어의 길이를 일정히 하여 주기위하여 와이어 절단기로 절단할 것이 요구된다. 그리고 로봇트를 고시된 위치로 이동하고 용접 모재와의 거리를 측정하여 그림 9와 같이 로봇트의 자세를 움직여 용접 와이어 선단이 모재와 닿는 점을 연산하여 용접시 최적의 위치, (a, h)점으로 용접 이어의 선단이 이동하도록 로봇트의 자세를 보정하여 준다.

8. 아크 센서 기능

아크 센서(Arc Sensor)는 용접 진행중 발생하는 위치에러를 보정하는 기능으로 아크 전압과 전류에 의한 보정데이터를 산출하여 로봇트의 자세를 보정하여 주는 기능이다.

그림 10에 워빙 용접중 아크 전압 전류의 특성을 나타내었다. 그리고 그림 11에서 워빙시 전류의 변화와 위치예러가 발생하였을 경우 전류의 변화를 나타내었다.

위치 예러가 없을때 전류값은,

$$\int_{t_c}^{t_0} i(t)dt = \int_{t_0}^{t_h} i(t) dt \quad (13)$$

와 같이 되며 용접 병의 위치가 오른쪽으로 치우쳐 위치 예러가 발생하였을 경우 전류값은,

$$\int_{t_c}^{t_0} i(t)dt < \int_{t_0}^{t_h} i(t) dt \quad (14)$$

와 같다.

위의 식에서 발생한 위치 예러정보를 로봇트 자세제어를 위한 정보로 전환하기 위하여 전류의 오차 값 E_{arc} 를 구하면,

$$E_{arc} = \int_{t_0}^{t_n} i(t) dt - \int_{t_L}^{t_0} i(t) dt \quad (15)$$

와 같으며 전류 오차를 위치 편차로 변환하면,

$$P_E = K_{arc} \times E_{arc} \quad (16)$$

로 나타나며 이때 K_{arc} 는 변환 이득이 되며 사용자의 의하여 주어지고 부호에 의하여 위치 보정의 방향이 결정되어 JPC에 전달되면 로봇의 자세는 tool좌표상에서 보정된다.

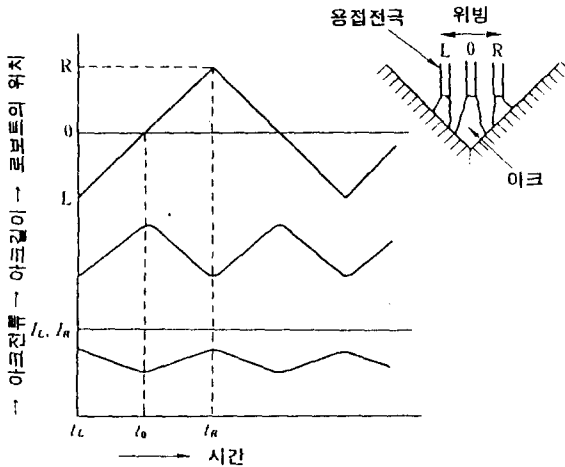


그림 10. 위빙 응접시 아크 전압과 전류의 특성
Fig. 10. Characteristic of arc Current and arc voltage from weaving.

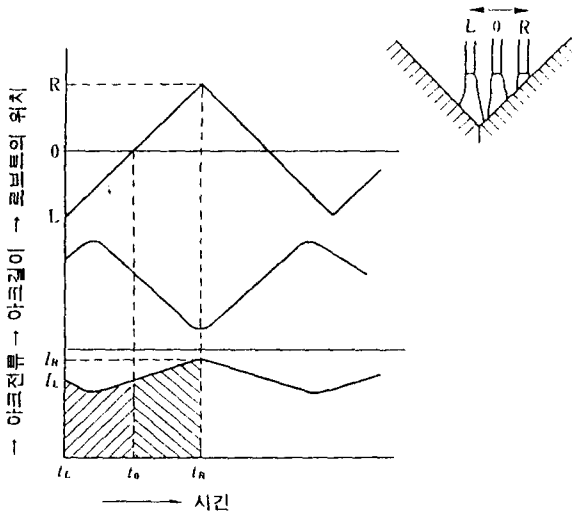
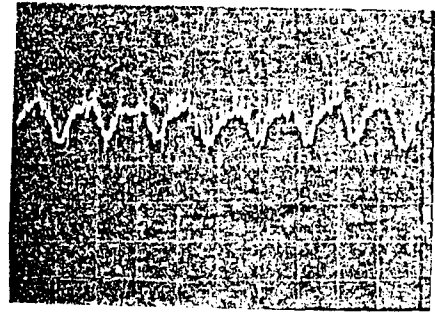


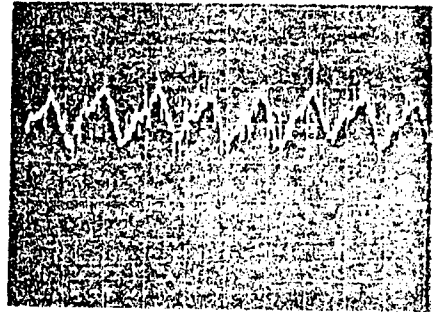
그림 11. 위빙 응접시 아크 전압과 전류의 특성
(위치 에러 발생시)
Fig. 11. Characteristic of arc Current and arc voltage from weaving.
(with position err)

위의 같은 알고리즘에 의하여 제어를 할 경우, 위빙 양 단점의 침투치를 비교하던 기존의 아크센싱 방법보다 위치예러 보상이 효과적이 었다. 또한 짐음이 많이 섞여있는 아크 전류를 이용한 아크센싱 기능으로 침투치를 이용하면 짐움에 의한 오동작을 유발할 수 있던 기존의 아크센서 기능을 전류의 적분 값을 이용하게 되므로 이러한 예러의 발생을 제거할 수 있다.

그림 12에 아크 센서를 이용하여 보정되는 전류의 파형을 나타내었다.



(a) 아크 센서가 없을때 [1V/0.5s div.]



(b) 아크 센서가 있을때 [1V/0.5s div.]

그림 12. 위빙에 의한 응접

Fig. 12. Welding process from weaving

아크 센서는 센서의 구성이 간단하여 저가의 구조로 설계가 가능하지만 후판의 맞대기 이음이나 필렛응접 같이 위빙이 가능한 그루브(groove)를 형성하는 경우 잘 적용될 수 있다. 그러나 박판의 겹치기 이음과 같이 위빙이 필요없는 경우에는 적용을 할 수가 없다는 단점이 있다.

9. 결론

본 연구에서는 로봇의 자세를 제어하기 위한 자세제어기, 응접 제어를 위한 응접 제어기, 그리고 사용자 인터페이

스와 제어기들간의 중재를 위한 주제어기로 구성된 용접 로봇 제어기를 구성하였고 이에 관련된 기술들을 언급하였다.

용접 품질의 향상을 위하여 저속의 연속 경로구간에서 로봇의 자세와 용접 아크 특성의 안정화가 요구되었으며 언급된 제어기에서 이들을 만족함을 알 수 있었다. 또한 아크열로 인한 모재의 변형으로 용접 경로의 왜곡이 발생하며 아크센서의 적응으로 경로의 보정을 가능하게 하였고 아크전류의 침투치를 이용하던 기존의 아크센싱 방법보다 전류의 적분값을 이용하는 아크센싱 방법이 보정오차의 발생을 제거할 수 있었다.

용접 로봇 제어기는 기존의 로봇제어기와 용접제어기를 효과적으로 집합시키는데 있으며 되먹임 전류와 전압, 혹은 용접용 특수 센서를 이용하여 로봇의 경로보정 데이터를 산출하는데 있다.

용접 로봇 제어기술은 특수 센서들을 요구하고 고정도 제어의 요구등 복합적인 제어기술이며 생산합리화에 따른 CAD/CAM 일괄 시스템과 생산라인에 필요한 신뢰성의 확보 그리고 인공지능과 신경망 시스템의 응용으로 용접 전문가 시스템의 개발이 과제로 남아있다.

참고 문헌

1. J. F. Lancaster, The Physics of Welding, Pergamon Press, Oxford, 1984
2. G. Adam, et al, "Sensing of GMAW Droplet Transfer Modes Using an ER 100s-1 Electrode", Welding Journal, Vol.69, No.3, 1990
3. T. Ogasawara, et al, "A Power Source for Gas Shield Arc Welding with New Current Waveforms", Welding Journal, Vol.66, No.3, 1987
4. W. G. Essers, at al, "Arc Control with Pulsed GMA Welding", Welding Journal, Vol.63, No.6, 1984
5. T. Mita, "Reducing spatter in CO₂ Gas Shield Arc Welding-Waveform Control", Welding International, No.3, 1989
6. G. E. Cook, at al, "Analizing Arc Welding Signals with a Microcomputer", IEEE Trans., on Automatic Control, Vol.27, No.7, 1982
7. D. E. Henderson, at al, "Adaptive Control of an Arc Welding Process", IEEE Trans., on Control Systems, Vol.13, No.1, 1993