

GMA 용접에서 전압과 전류의 동특성에 관한 연구 A Study on Dynamic Characteristics of Welding voltage and Welding Current At GMAW

김 면 희*, 최 영 근**, 이 문 환**

Myun-Hee Kim*, Young-Geun Choi**, Moon-Hwan Lee**

<Abstract>

Welding variables and condition in gas metal arc welding (GMAW) effect on the weld quality and productivity, extensive research efforts have been made to analyze the welding variables and conditions. In this study dynamic behavior of GMAW system is investigated using the characteristic equations of the power supply, wire and welding arc. Characteristic equation of wire is modified to include the effect of droplets attached at the electrode tip. The dynamic characteristics of arc length, current, voltage with respect to the step, ramp inputs of CTWD was simulated. From results of simulation, some predictions about dynamic characteristics of GMAW and welding process are available. The proposed simulator and results appear to be utilized to determine the proper welding conditions, to be improved by considering power supply dynamic characteristics.

Key Word : GMAW, Dynamic Characteristic of Arc, Numerical Analysis, Simulation

1. 서 론

최근 용접 공정의 자동화에 따른 용접 품질에 대한 관심이 커짐에 따라 용접 공정에서의 용접 조건과 변수들이 용접 품질의 향상과 생산의 경제성을 높이는데 미치는 영향에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.¹⁾²⁾ 이러한 용접 변수의 영향은 용접 공정과 품질에 큰 영향

을 미치기 때문에 용접 변수에 대한 충분한 이해와 설정이 용접 공정을 수행하는데 있어 필수적이다.³⁾⁴⁾

본 연구에서는 GMA 용접에 대한 모델링을 통해 용접 공정에서의 아크 길이와 용접 전류의 동특성을 살펴봄으로써 용접 시스템에 대한 이해와 특성을 파악하고자 한다.

* 정회원, 경북대학교 대학원 기계공학과
구미1대학 차량기계과
E-mail : ipconfig@chollian.net
** 정회원, 구미1대학 차량기계과

* Kyungpook National University Graduate School
Kumi 1 College
E-mail : ipconfig@chollian.net
** Kumi 1 College

2. 용접 시스템 모델링

2.1 용접기 회로 모델링

용접기 회로는 크게 용접 전원부와 아크부로 나눌 수 있다. 용접시 전원부와 아크부는 서로 다른 회로적 기능과 물리적인 현상으로 나누어 생각할 수 있다.⁵⁾ Fig.1은 용접기 회로의 모델이다. 전체적인 용접기 회로 시스템을 수식으로 표현하면 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.⁶⁾

$$U_o = (L_{ps} + L_c) \frac{dI}{dt} + (R_{ps} + R_c + R_e)I + U_{arc} \quad (1)$$

여기서 I : 전류

U_{arc} : 아크 전압

U_o : 개방 전압

L_{ps} : 용접기 인덕턴스

L_c : 케이블 인덕턴스,

R_c : 케이블 저항

R_{ps} : 용접기 내부 저항

R_e : 돌출 길이 저항

용접 전압 U_w 은 식(2)로 표현된다.

$$U_w = (R_c + R_e)I + U_{arc} \quad (2)$$

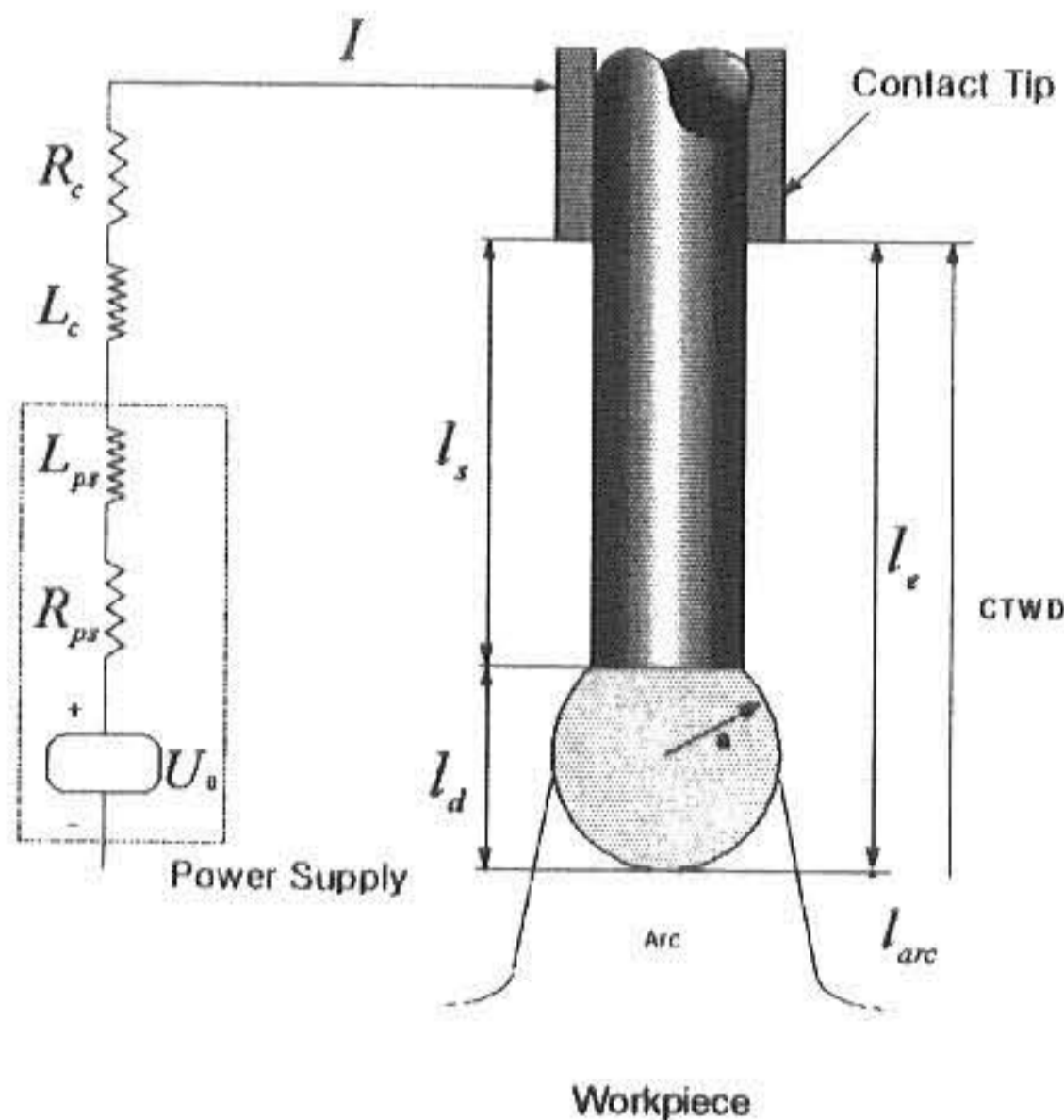


Fig. 1 Modeling of Welding System

아크 전압은 용접 전류가 일정하면 아크 길이에 비례하며, 전류와 아크 길이의 함수 관계에서 식(3)으로 표현된다.

$$U_{arc} = U_{ao} + R_a I + E_a l_{arc} \\ E_a = E_{al} + E_{ai} I \quad (3)$$

여기서 l_{arc} : 아크 길이

U_{ao} : 아크 전압의 상수

R_a : 아크의 전기적 저항

E_a : 아크의 전기장 세기

2.2 용접봉 용융 모델링

2.2.1 용접봉 용융 특성

Lesnewich는 많은 실험을 통해 용접봉의 용융 속도, 용접 전류, 돌출 길이와의 관계를 식(4)로 표현하였다.⁷⁾

$$v_m = aI + b l_e I^2 \quad (4)$$

여기서 l_e : 돌출 길이

a, b : 상수

상수 a, b 는 용접봉의 재질 및 지름, 금속 이행 모드, 보호 가스의 종류 등에 따라 다르며 통상 실험적으로 얻어진다. 일반적으로 용접봉에서 용융된 금속이 용접봉의 끝에서 연속적으로 v_m 의 속도를 가지고 이탈이 된다면, 시간에 대한 용접봉 돌출 길이의 변화율은 송급 속도 및 용융 속도의 관계에서 식(5)로 표현할 수 있다.

$$\frac{d l_e}{dt} = v_w - v_m \quad (5)$$

여기서 v_w : 용접봉 송급 속도

식(5)는 용적이 생성되어 용접봉 끝의 형상에

변화가 없고, 용적이 생성되자마자 용적이 연속적으로 이탈하는 스프레이(Spray) 모드 경우에 적용이 가능하다. 그러나 단락 이행(Short-circuit) 이나 입상 용적(Globular) 모드에서는 스프레이 모드와는 달리 용적이 상당히 긴 시간동안 용접봉의 끝에 머물다가 용융풀에 접촉을 하거나 용접봉에서 이탈되기 때문에 식(5)를 그대로 적용하는 것은 곤란하다. 그리고 용적이 생성된 후 빠른 시간내에 용적이 이탈되지 않고 용접봉에 머물면서 용적의 부피가 동적으로 변화하기 때문에 아크의 길이에 영향을 미쳐 전류와 전압에 큰 영향을 줄 수가 있다. 그러므로 용적의 크기를 고려하여 돌출 길이를 Contact-tip 에서 고액 경계면까지의 길이 l_s 와 용적의 길이 l_d 를 이용하여 식(6)으로 나타낸다.

$$l_e = l_s + l_d \quad (6)$$

그러므로 고액 경계면의 속도 변화를 용접봉 송급 속도와 용융 속도의 차에 의해 식(7)처럼 나타낸다면 스프레이 모드 이외의 경우에도 적용이 가능할 것이다.

$$\frac{dl_s}{dt} = v_w - v_m \quad (7)$$

2.2.2 용융된 용적의 부피

용접봉에서 동적으로 성장하는 용적의 부피 변화는 성장하는 용적의 형태가 완전한 구(球)의 형태라고 가정한다면 식(8)로 나타낼 수 있다.

$$\frac{dV_0}{dt} = v_m \left(\frac{\pi d_e^2}{4} \right) \quad (8)$$

여기서 d_e : 용접봉의 지름

용적의 부피를 V_0 라고 한다면 용적의 길이와 관련해서 부피를 두 가지 경우로 생각할 수가 있다. 즉, 부피가 용접봉의 지름 d_e 를 반구의 직경으로 하는 반구의 부피보다 큰 경우와

반구의 부피보다 작은 경우의 두 가지 경우인데, 각각의 경우에 따라 용접봉의 지름 d_e 를 구하는 식은 달라진다.

전자의 경우($V_0 > \frac{2\pi (d_e/2)^3}{3}$) 용적의 부피는 식(9)와 같이 된다.

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi a^3 - \frac{1}{3} \pi h^2 (3a - h) \quad (9)$$

여기서 a : 용적의 반지름

$$h = a - \sqrt{a^2 - \left(\frac{d_e}{2}\right)^2}$$

식(9)를 이용하면 용적의 길이 l_d 는 식(10)으로 표현된다.

$$l_d = 2a - h \quad (10)$$

후자의 경우($V_0 < \frac{2\pi (d_e/2)^3}{3}$) 용적의 부피는 식(11)과 같이 된다.

$$V_0 = \frac{1}{3} \pi h^2 (3a - h) \quad (11)$$

식(11)을 이용하면 용적의 길이 l_d 는 식(12)로 표현된다.

$$l_d = h \quad (12)$$

식(9), (10), (11), (12)를 이용하면 각 시간에 따른 용적의 부피가 주어질 때 용적의 반지름을 계산할 수 있고, 계산된 용적의 반지름으로 l_d 를 계산할 수 있다.

2.3 용적의 이탈 조건

용융된 용적이 용접봉 끝으로부터 이탈 여부를 판단하는 방법은 힘 평형(Force Balance) 모델과 Pinch Instability 이론이 있다.

2.3.1. 힘 평형 모델(Force Balance Model)

일반적으로 힘 평형 모델은 입상 용적 모드에 적용되며 용적에 작용하는 4가지 힘들, 즉 중력, 표면장력, 전자기력, 항력의 합을 계산하여 비교함으로써 용적의 이탈 여부를 판단하는 것이다. 용융부에 작용하는 힘은 크게 용적의 이탈을 촉진하는 이탈력(detaching force)과 용적의 이탈을 방해하는 부착력(attaching force)으로 구분한다. 이탈력에는 전자기력(F_m), 중력(F_g), 항력(F_s)이 있고, 부착력에는 표면장력(F_r)이 있다. 용융부를 강체로 가정하고 작용하는 힘의 평형 관계는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$F = F_m + F_s + F_g - F_r \quad (13)$$

여기서 F 는 용적의 이탈과 관계된 힘들의 합력이고, 만일 0보다 크다면 용적의 이탈이 시작되는 것으로 판단한다. 전자기력은 이탈력으로 작용하며 식(14)로 표현된다.

$$F_m = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left\{ \ln \frac{2a \sin \theta}{d_e} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right\} \quad (14)$$

항력은 이탈력으로 작용하며 식(15)로 표현된다.

$$F_s = \frac{1}{2} C_d A_p \rho v_g^2$$

$$C_d = \frac{24}{Re} + \frac{6}{\sqrt{1 + Re}} + 0.4 \quad (15)$$

$$Re = \frac{2 \rho_g v_g a}{\mu_g}$$

여기서 A_p : 투영 면적(Projected area)

v_g : 보호 가스 속도

μ_g : 보호 가스 점성 계수

C_d : drag 계수

표면 장력은 용적의 이탈을 방해하는 부착력

으로서 고체 용접봉과 용융 용적의 경계에서 작용하며 식(16)으로 표현할 수 있다.

$$F_r = \pi d_e \gamma \quad (16)$$

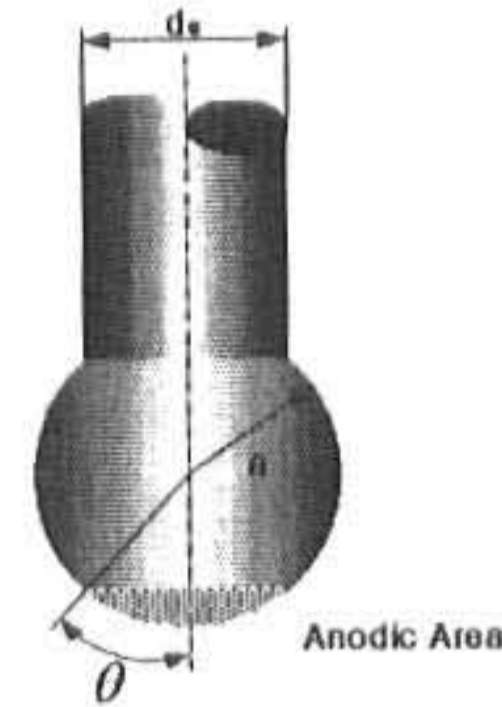


Fig. 2 Assumed geometry of a drop for calculation of static forces

2.3.2 Pinch Instability 이론

Pinch Instability 이론은 스프레이 모드에 적용되며 표면 장력과 전류에 의해 발생하는 핀치력으로부터 용적의 길이가 어떤 값 이상이 되면 불안정하게 되어 파단이 일어나는 조건을 이용하여 금속 이행을 해석한다.

즉, 용융부를 전류가 흐르는 무한 실린더로 가정하고 전자기력에 의한 압력 분포를 계산하며, 미소 외란에 대해 Pinch부와 Bulge부의 압력을 비교함으로써 용융된 용적의 이탈을 설명한다. 임계 파장 λ_c 은 식(17)로 표현된다.

$$\lambda_c = \frac{2\pi R}{\sqrt{1 + \frac{\mu_0 I^2}{2\pi^2 R \gamma}}} \quad (17)$$

여기서 γ : 표면 장력

용융부의 길이가 λ_c 이상이 되면 용융부 내부가 불안정해지고 파단이 발생하여 용적이 이탈되는 것으로 간주한다.

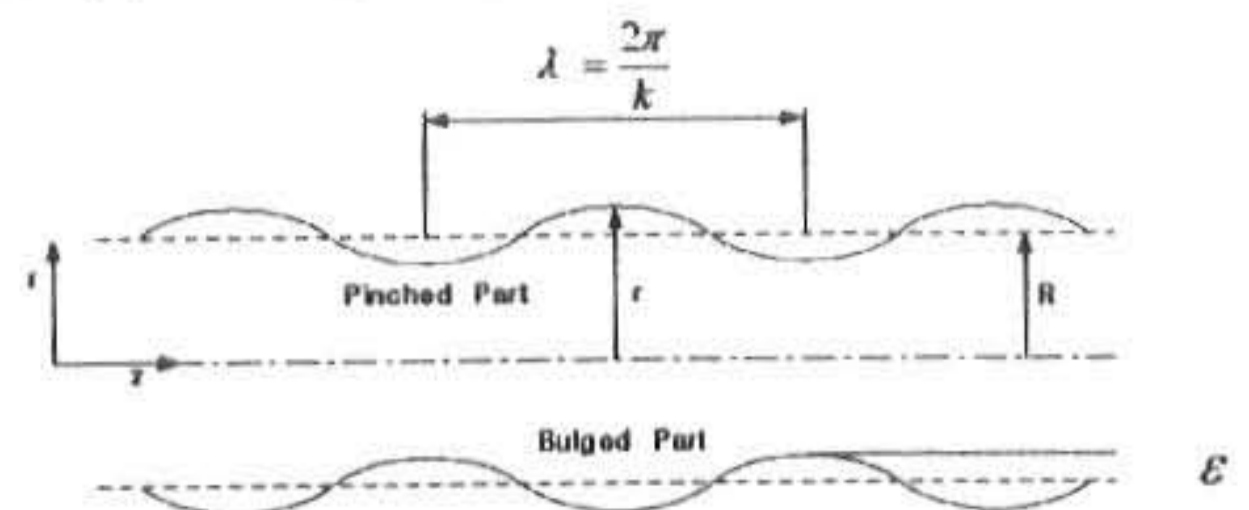


Fig.3 Geometry of a liquid column with axial disturbance

2.4 시뮬레이터(Simulator)

2.4.1 동특성 미분 방정식

앞에서 언급한 내용과 식들을 바탕으로 용접기 시스템과 입상 용적과 스프레이 모드에 대한 동특성을 파악하고자 한다. 2.2절과 2.3절의 내용을 정리하면 용접전류와 전압, 그리고 용융 용적의 부피에 관하여 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dI}{dt} = \left(\frac{1}{L_{ps} + L_c} \right) [(R_{ps} + R_c + R_e)I + U_{a0} + R_a I + (E_{al} + E_{ai}) l_{arc} - U_0] \quad (18)$$

$$\frac{d l_s}{dt} = v_w - (aI + b l_e I^2) \quad (19)$$

$$\frac{d V_0}{dt} = (aI + b l_e I^2) \left(\frac{\pi d_e^2}{4} \right) \quad (20)$$

$$V_0 = \frac{4}{3} \pi a^3 - \frac{1}{3} \pi h^2 (3a - h) \quad (21)$$

$$l_d = 2a - h \quad (22)$$

식(18), (19), (20)을 살펴보면 시간에 따른 용접 전류와 Contact-Tip에서 고액 경계면까지의 거리, 용적의 부피 등으로 표현된다.

또한 식(18), (19), (20)은 동적 시스템을 기술하는 비선형 미분 방정식의 형태로 표현된다.

위의 식들을 상태 변수형으로 표현하여 동적 시스템의 물리적인 특성을 파악할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 상태변수(I, l_s, V_0)형 미분 방정식의 형태를 Fourth order Runge-Kutta 방법을 사용하여 시간 간격 0.05ms마다 용접 시스템의 동특성을 파악한다.

2.4.2 시뮬레이터(Simulator)

시뮬레이터는 GMA용접의 동적 특성을 쉽게 확인할 수 있도록 GUI 환경으로 작성하였으며, Visual C++ 6.0을 사용하여 구현하였다.

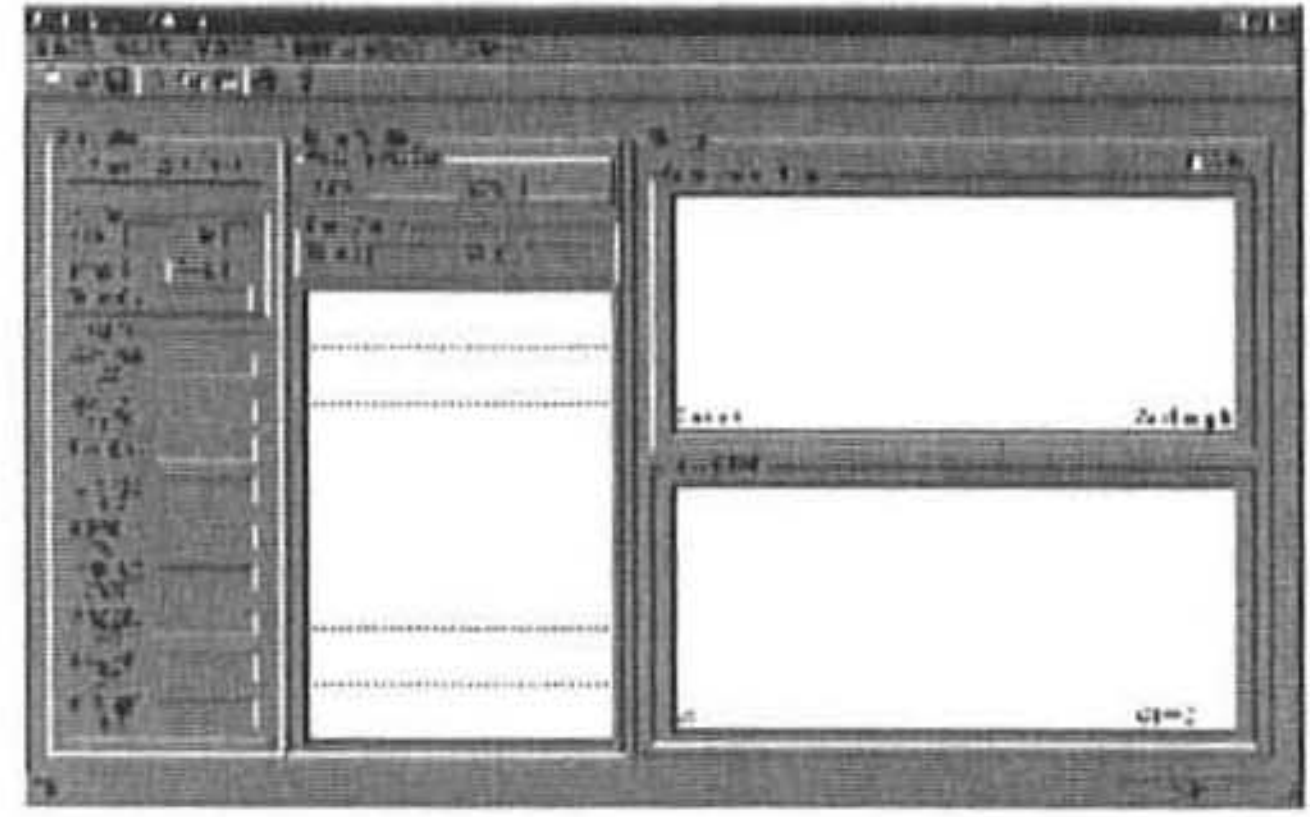


Fig.4 Developed simple GMAW simulator

2.4.3 시뮬레이션(Simulation)

시뮬레이션(Simulation)에 앞서 초기 조건 및 경계 조건을 정한다. 초기 조건은 용접이 진행되기 전에 입력되는 초기값이다. 본 연구에서는 각각의 모드에 대한 개방 전압, 용접봉의 송급 속도, CTWD를 입력값으로 한다. 이런 초기값을 입력하여 시간에 대한 용접 전류, 아크 길이, 부피의 변화를 동적으로 관찰하게 될 것이다. 입상 용적과 스프레이 모드를 구별하기 위해 1.2mm steel 용접봉의 천이 전류인 220A를 기준으로 하였다.

입상 용적과 스프레이 모드에서 사용한 초기값과 각종 입력되는 상수값은 일반적으로 실험에 사용되는 값을 사용하였으며, Table.1 과 Table.2 에 나타내었다.

Table. 1 Initial value in Globular and Spray mode

	Globular mode	Spray mode
송급 속도	104.3mm/s	156.1mm/s
개방 전압	27.3V	32.5V
CTWD	25mm	19mm

Table.2 Material properties of mild steel

Mass density	7800 kg/ m ³
Surface tension coefficient	1.2 N/m
Permeability	4 π × 10 ⁻⁷ H/m

3. 용접 시스템 특성

3.1 자유응답(Free Response)

Fig.5은 Globular모드와 Spray모드에서의 전류의 자유 응답(Free Response)을 나타낸다. 용접이 시작된 후 자유 응답은 1차 시스템의 거동과 유사하게 나타난다. 용접 전류가 Steady State 상태로 되기 위한 안정한 영역까지의 걸리는 시간이 Globular모드가 Spray모드보다 더 걸리는 것을 볼 수가 있다. 이것은 Globular모드가 용적이 생성되어 이탈되는데 소요되는 시간이 Spray모드보다 더 걸리기 때문에 안정 영역에 도달하는 자유 응답 시간(Free Response Time)이 더 길어지는 것으로 생각된다. Fig.6는 자유 응답 시간이 지나 용접이 안정되게 진행될 때 용접 전류 신호와 아크 길이를 나타낸다. Globular모드의 경우는 용적의 크기가 크므로 주로 낮은 주파수로 이행되며, 용접봉 끝에서 이탈될 때, 아크 길이가 순간적으로 증가하므로 이에 따라 용접 전압이 증가하며, 용접 전류는 감소됨을 볼 수 있다. Spray 모드의 경우는 작은 용적이 빠른 주기로 이행되므로 아크 길이가 비교적 일정하며 용접 전압 및 전류의 변동 폭이 작게 일어남을 볼 수 있다.

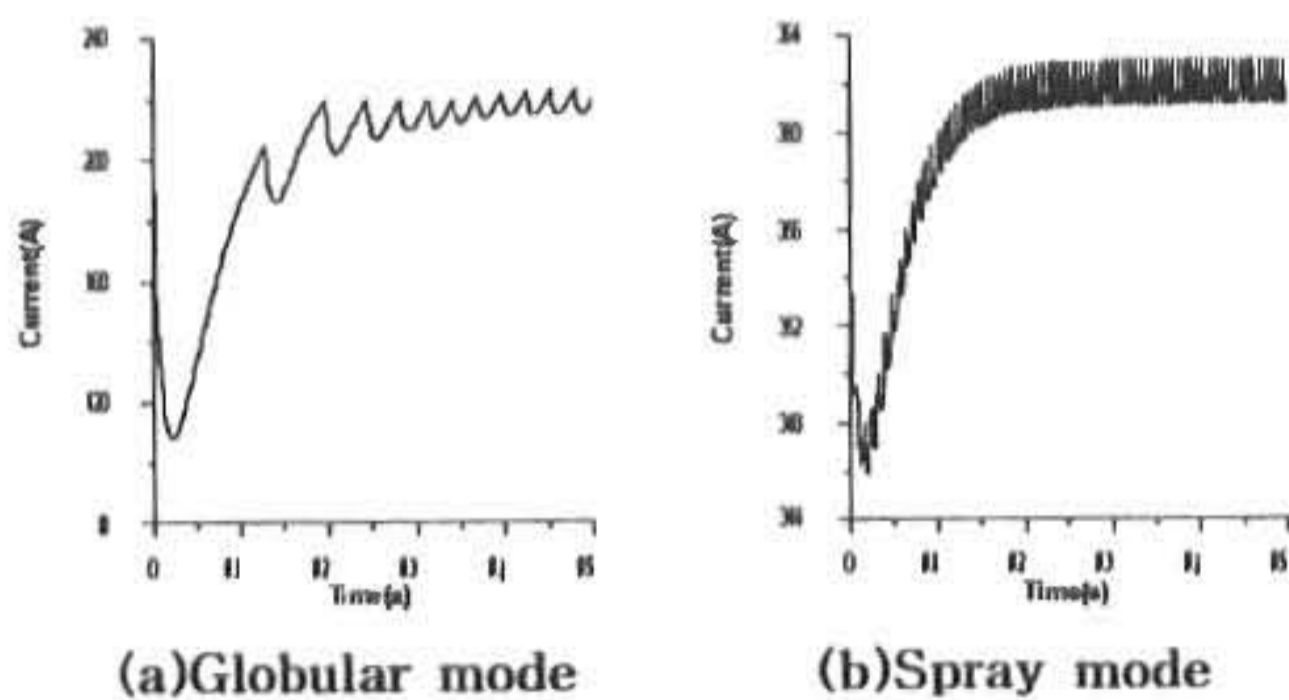


Fig.5 Free response

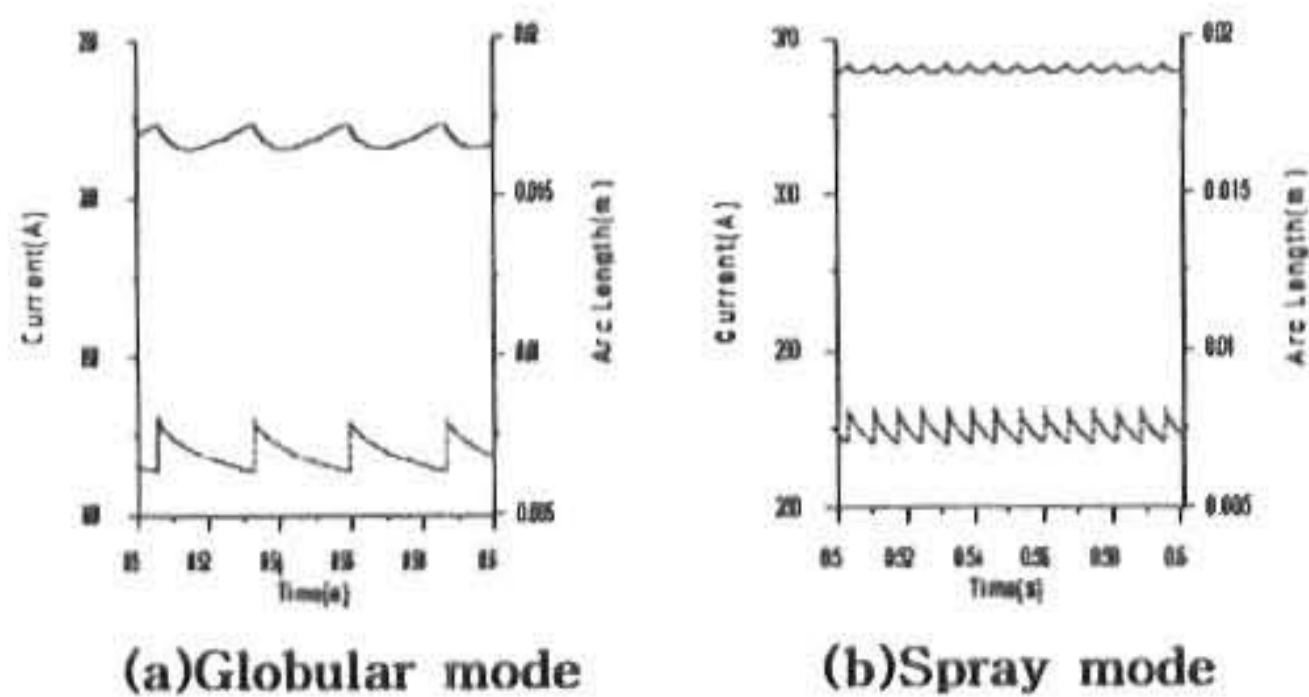


Fig.6 Steady state response

3.2 계단(Step) 입력에 대한 응답

Fig.7~8은 용접이 진행 중 겹치기 이음(Lap Joint)형태의 계단 입력을 만났을 때의 각각의 모드에 대한 시뮬레이션 결과이다. 본 논문에서는 Contact-Tip과 모재 사이의 거리(CTWD)를 변화시켜 현상을 관찰하였다. CTWD가 작을수록 전류가 크게 나타나고, 아크의 길이는 전류의 변동에 대해 반대로 일어남을 알 수가 있다. Fig.7~8의 용적의 크기에서도 CTWD가 짧아지는 순간에는 전류가 급격하게 증가해서 용적의 크기가 작은 용적들이 많이 이탈된 후 다시 안정 영역으로 진행된다.

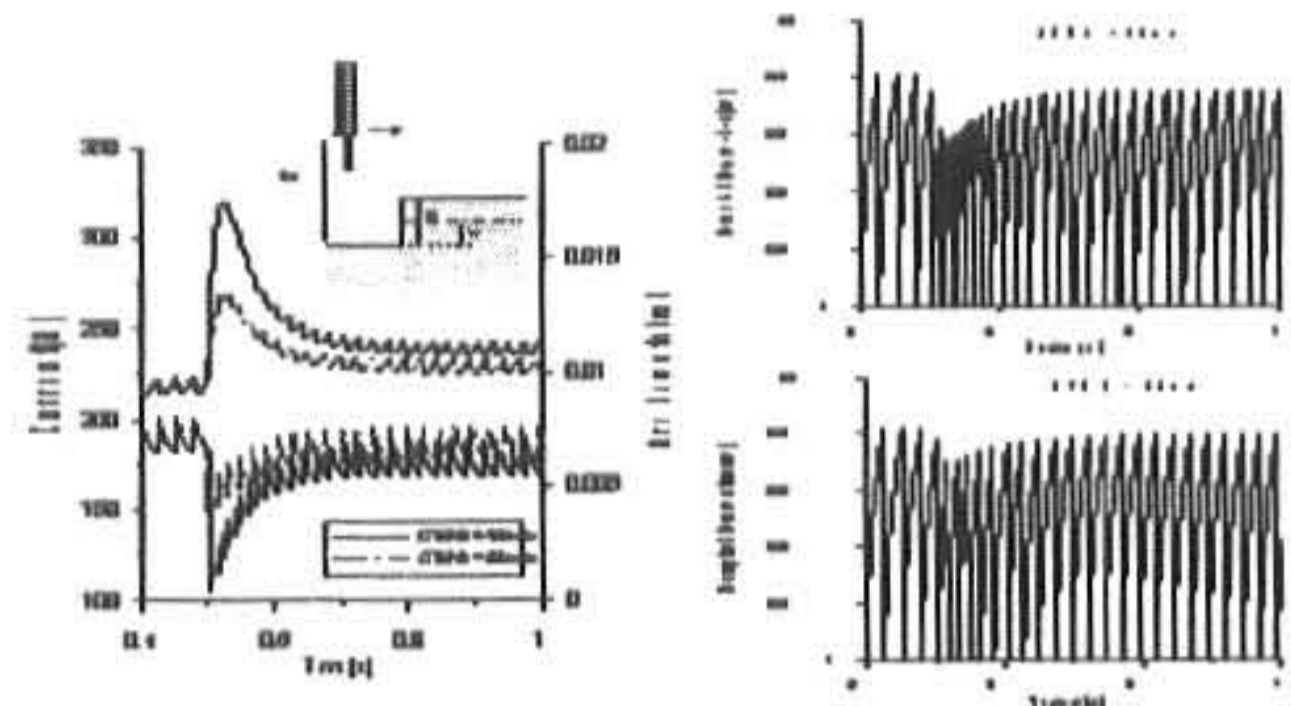


Fig.7 Globular mode in step input

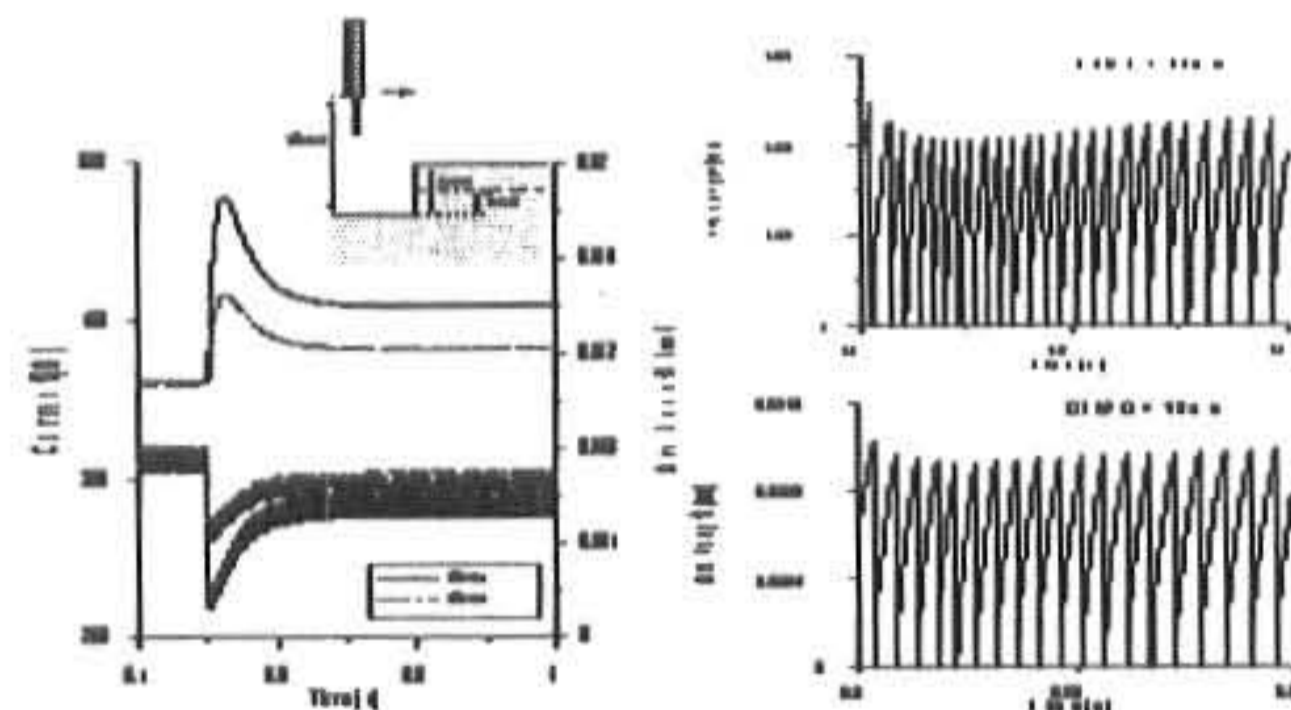


Fig.8 Spray mode in step input

3.3 경사(Ramp) 입력에 대한 응답

Fig.9는 용접 진행 중 경사면을 만났을 때에 각각의 모드에 대한 응답을 나타낸다.

그림에서 볼 수 있듯이 용접 팁의 이동 속도가 큰 경우에는 어느 정도 길이를 따라가다가 아크가 꺼져서 전류가 0이 됨을 알 수가 있었다.

본 연구에서는 각도 15°에서는 4mm/s 정도의 속도로 팁을 이동시킬 경우의 응답특성을 살펴보았다.

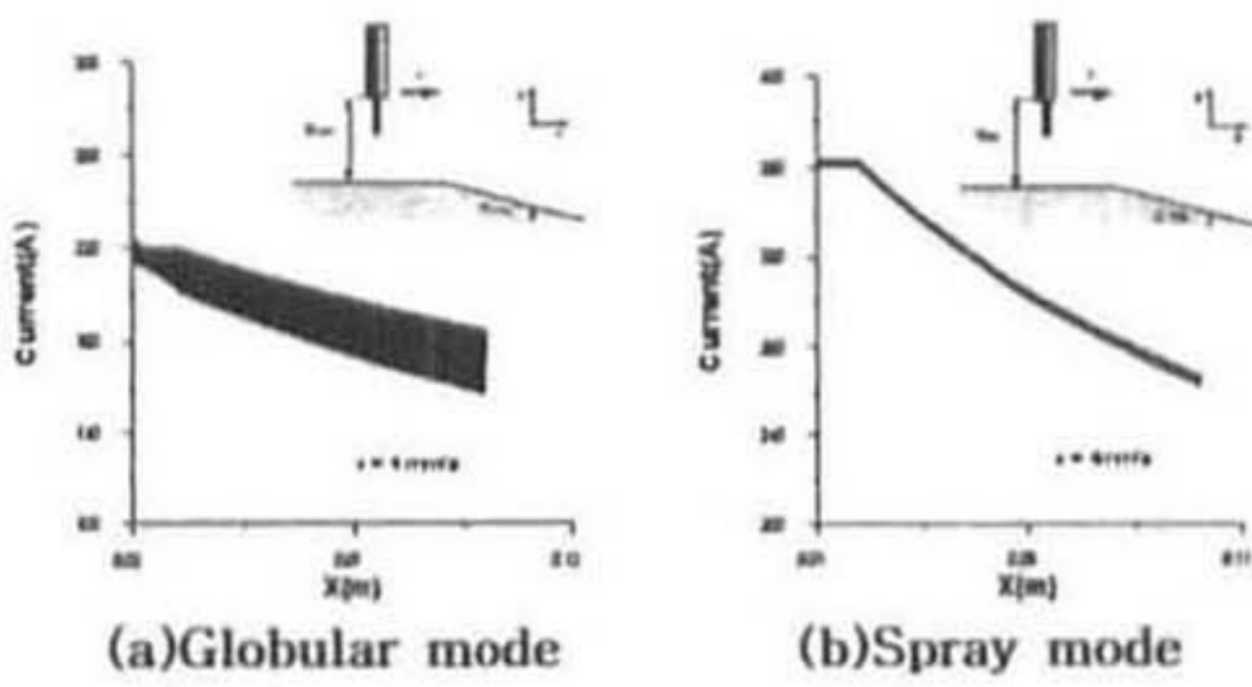


Fig.9 Steady state response

3.4 개방전압의 변화에 대한 응답

Fig.10~11은 개방 전압을 변화시켰을 때 나타나는 전류와 아크 길이에 대한 결과이다. 개방 전압을 변화시키면 전류의 큰 변화가 일어난다. 전류의 경우에는 앞에서 언급한 Contact-Tip과 모재 사이의 거리(CTWD)의 계단 입력에 대한 현상과 비슷하게 나타나지만, 아크길이

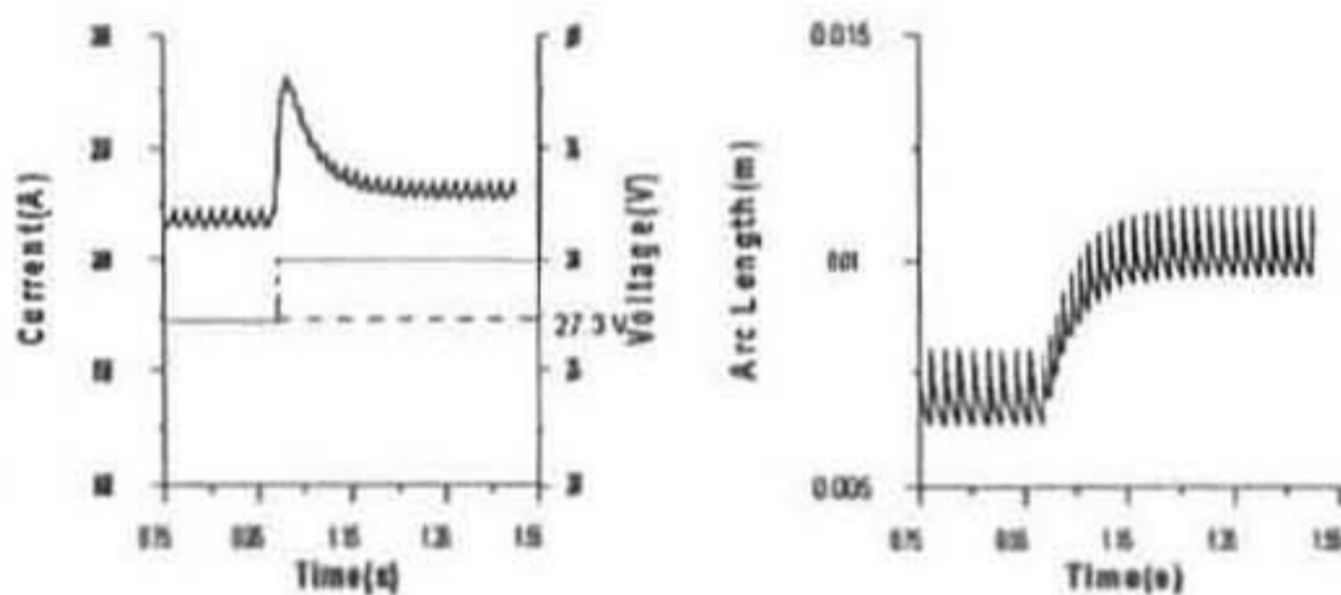


Fig.10 Current due to voltage change in Globular mode

의 경우에는 다르게 나타난다. 전류의 급격한 변화로 아크의 길이와 용적의 크기가 전류의 크기에 따라 다르게 변한다.

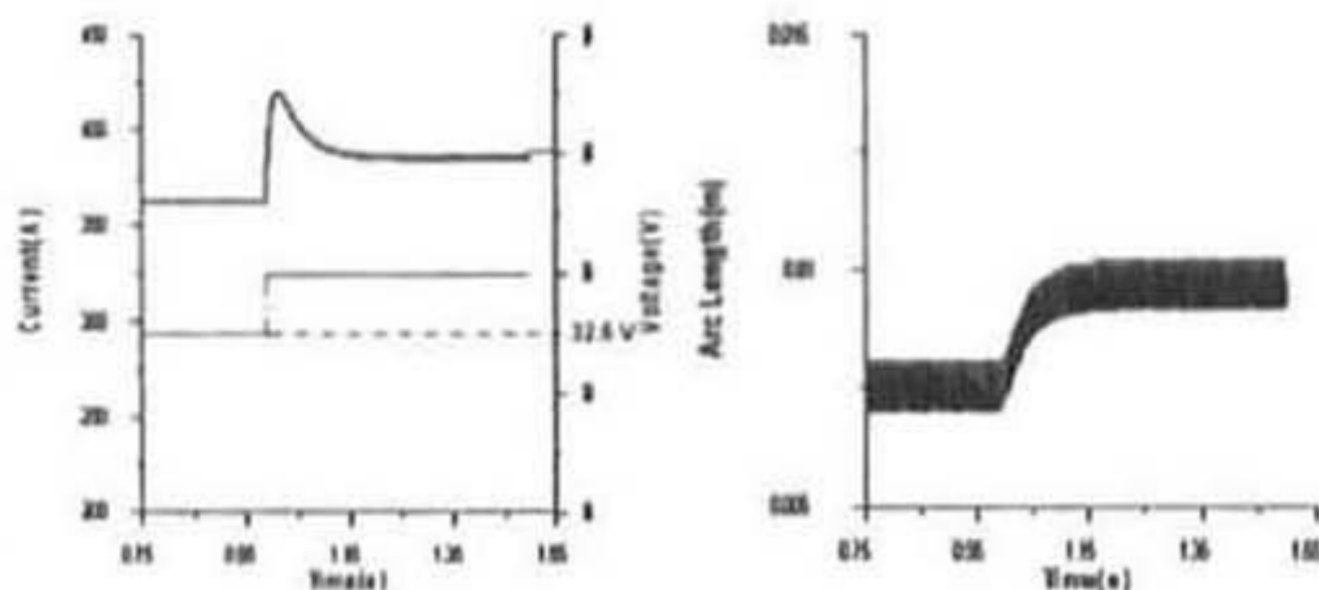


Fig.11 Current due to voltage change in Spray mode

4. 결론

시뮬레이션을 통하여 용접이 시작되고 용접 공정이 올바르게 수행되기 위해서는 모드에 따라

적당한 시간이 걸리는 자유 응답(Free Response) 시간이 필요하다는 것을 확인할 수 있었다. Contact-Tip과 모재 사이의 거리(CT-WD)의 계단 응답에서도 계단의 높이에 따라 전류의 변화가 다르게 나타나는 것을 볼 수가 있었으며, 경사면 입력에 대하여서도 응답특성을 확인할 수 있었다. 그리고 개방 전압이 변하는 경우에 대해 용접 전류와 아크 길이의 동특성에 대해 살펴보았다. 용접 현상에서 중요한 요소인 용접 전류와 아크 길이에 대한 동특성을 제대로 파악함으로써 실제 용접 시스템과 현상을 제대로 파악하고 용접 시스템을 적절하게 제어할 수 있을 것으로 생각된다. 또한 용접 전류와 아크 길이의 동특성에 대한 올바른 이해는 용접 자동화 공정의 한 부분인 용접선 추적(Seam Tracking) 알고리즘에 대한 기본적인 정보가 될 수 있으므로, 금후 용접선 추적에 대한 연구의 기초자료로서 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- 1) Lancaster, J.F : The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press, (1985)
- 2) 최상균 : GMA용접의 금속이행에 관한 동적 해석, 박사학위논문, KAIST, (1998)
- 3) 이재영 : 단순모델을 이용한 GMA 용접 시스템의 동적거동 해석, 석사학위논문, KAIST, (1999)
- 4) 이원수 : Neuro-Fuzzy를 이용한 GMA용접의 비드형상에 대한 기하학적 추론, 석사학위논문, 경북대학교, (2000)
- 5) 용접접합편람 : 대한용접학회, pp.525-526, (1998)
- 6) Ushino, M. and Mao, W. : Modeling of the arc sensor for DC MIG/MAG welding in open arc Mode - A study on the improvement of the sensitivity and the reliability of the arc sensor in GMA welding(1st report), Journal of Japan Welding Society, Vol.14, No.1, (1994)
- 7) A. Lesnewich : Control of Melting Rate and Metal Transfer in Gas-Shielding Metal-Arc Welding. Pt 1, Control of Electrode Metal Rate, Weld. J., 37-8, pp.343s-353s, (1958)

(2001년 4월7일 접수, 2001년 5월 25일 채택)