

研究論文

가스 메탈 아크 용접에서 단락현상 모델링 및 스파터 감소를 위한 전류파형 선정에 관한 연구

황 주호* · 문 형순** · 나 석주** · 한 광수***

A Study on Modeling of Short-Circuiting Phenomena and Selection of Current Waveform for Reduction of Spatter in GMAW

J. H. Hwang, H. S. Moon, S. J. Na and K. S. Han

Key words : Spatter, Short-circuiting, arcing, GMA welding, Welding power source, Electromagnetic force, Current wave form, Fuzzy rule base

Abstract

With an expansion in automation of welding processes, emphasis has been shifted from other welding processes to the GMA welding. However, there is a problem with this process that the spatter occurs very frequently. In GMA welding, there are several types in the way of metal transfer from the electrode wire to the weld pool, which have a close relationship with the spatter generation.

This study was concerned with the spatter occurring in the short-circuiting transfer. In welding with short-circuiting, the electromagnetic force formed by the welding current facilitates the rupture of the metal bridge between the wire and workpiece and ensures the normal process of the welding process. However, the spatter can be generated from the droplet because of the upward magnetic force, when the droplet contacts with the weld pool. The passage of current through the bridge results in the accumulation of the thermal energy, which causes the bridge to explode in the final stage of short-circuiting, thus forming the spatter. Based on the above phenomena in conjunction with other experimental results published, the physical phenomenon related with the occurrence of spatter was modeled and the current waveform was investigated

* 비회원, 한국기계연구원

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 비회원, 조흥전기산업(주)

to reduce the spatter. Finally, the fuzzy rule based method was proposed to predict the time of short-circuiting and arcing in the metal transfer.

1. 서 론

최근 산업현장에서는 생산성과 자동화 측면에서 CO₂를 보호가스로 사용하는 가스 메탈 아크 용접의 적용도가 점점 증가하고 있는 추세이다. 하지만 가스 메탈 아크 용접에서 나타나는 문제점의 하나가, 단락모드(short-circuiting mode)를 사용한 경우 스패터의 발생량이 많은 것이다. 스패터는 용접 토치의 노즐 및 모재에 축적되어 이를 제거하기 위한 공정이 부가적으로 필요하며, 모재 표면의 미관뿐만 아니라 계속되는 다른 공정에도 지장을 주어 시간과 비용 면에서 효율을 저하시키는 요인으로 작용한다. 가스 메탈 아크 용접은 전류의 크기, 펄스의 유무 그리고 보호 가스에 따라 금속 이행(metal transfer) 현상이 다르게 나타나며 이행 현상에 따라 스패터의 발생 형태 또한 차이가 난다. 이온화 에너지가 Ar에 비하여 상대적으로 높은 CO₂ 가스를 보호 가스로 사용하는 경우 스패터의 문제는 더욱 심각해진다. CO₂ 가스를 사용하면 고전류에서도 입상 용적 이행(globular transfer)을 하게 되고, 이 경우 양극(anode)의 아크의 변화와

표면 형상에 따라 힘의 방향이 결정되는데 전자기력, 중력, 표면장력의 합력이 상승 방향으로 작용하거나 전자기력의 작용점과 무게중심이 다르면 회전력에 의하여 용융 금속이 스패터로 비산된다¹⁾. 반면 보호가스로 Ar을 사용한 경우 고전류에서는 일반적으로 스프레이 이행(spray transfer)을 하고 아크도 안정되어서 스패터의 발생 가능성이 비교적 적다.

저 전류의 경우는 일반적으로 단락 이행(short-circuiting transfer)을 한다. 이 경우 용융지와 용적이 접촉을 하면서 금속 이행을 하고, 접촉부가 분리되면서 아크가 발생하는 과정을 반복한다. 일반적으로 접촉부는 급격하게 기화되며 아크가 발생하는 마지막 단계에서 스패터의 발생률이 가장 높고, 아크가 소멸되면서 접촉이 진행될 때 전자기력에 의하여 스패터가 발생하는 경우도 있다.

1970년대 초반 이후 고속 카메라의 보급과 함께 스패터의 발생 원인에 관한 연구가 본격적으로 이루어지고 있다. 이 연구에 따르면 단락 아크 용접에서 금속이행이 시작되는 단계와 끝나는 단계에서 스패터가 많이 발생하는 것이 관측되었다. 스패터 발생은 주변의 비선형적인 요인과 이로 인한 복잡한 물리현상 때문에 정확히 규명하기 힘들지

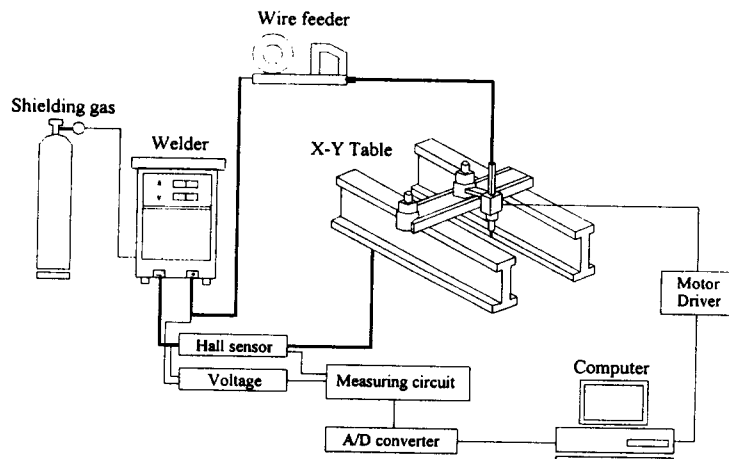


Fig. 1 Experimental apparatus to measure welding current and arc voltage

만, 접촉이 시작될 때 전자기력의 영향과 아크 발생과 함께 수반되는 폭발에 의한 충격파가 주된 원인이라 밝혀지고 있다²⁻⁵⁾. 본 연구에서는 단락 아크 용접의 스패터 발생과 관련된 물리적 현상을 수학적으로 모델링하고 이를 이용해서 스패터를 감소할 수 있는 용접파형을 선정하고자 한다. 또한 선정된 용접파형을 구현하기 위해서 변화하고 있는 파형의 특징을 예측할 수 있는 특성을 가진 퍼지논리를 제안하고자 한다. 이를 위한 실험장치를 Fig. 1에 나타내었다. 용접전류는 홀센서(hall sensor)를 이용하여 측정하였으며 아크전압은 증폭기(amplifier)를 이용하여 측정하였다. 샘플링 속도는 5Khz로 하였으며 IBM 386DX를 이용하여 신호처리를 하였다.

2. 단락이행의 모델링

단락 이행은 다른 금속 이행과는 달리 아크가 발생하지 않는 상태에서 금속 이행을 하는 시간이 존재한다. 단락 아크 용접의 이행 현상은 I) 용적과 용융지가 접촉하며 아크가 꺼지는 순간, II) 용적이 용융지에 융합되는 부분, III) 브리지(bridge)가 형성되면서 용적이 용융지로 이행되는 부분, IV) 브리지의 파단 부분, V) 아크의 발생 부분과 VI) 아크가 유지되며 다음 주기의 용적이 생성되는 부분으로 나눌 수 있다. 이상과 같이 단락 아크 용접은 급격한 상태 변화로 인한 불안정한 현상이 유발되어 스패터가 발생되기 쉽다. 단락 아크 용접에서 스패터는 여러 상태에서 발생할 수 있으나 I)과 IV) - V)에서 많이 발생하고 전류의 크기에 따라 발생 가능성이 다르다.

2.1 용적이 용융지에 접촉할 때 전자기력 모델

접촉하는 용적에 작용하는 전자기력을 정확히 분석하기는 매우 어려우며 따라서 모델링의 복잡성을 피하기 위하여 다음과 같이 가정하였다.

(1) 전류, 자기장, 용적은 Fig. 2과 같이 z-축에 관하여 대칭이다.

(2) 모체에 흐르는 전류에 의한 자기장은 무시할 수 있다.

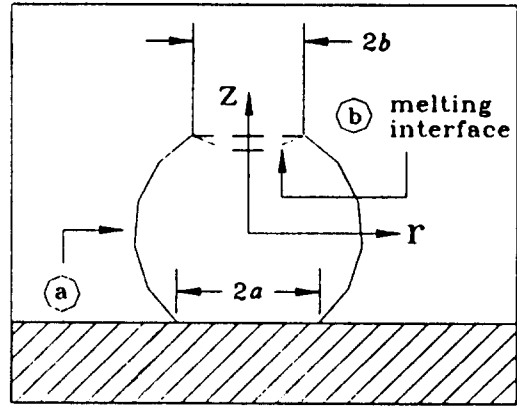


Fig. 2 Typical shape of droplet contacting with molten pool

(3) Fig. 2의 경계⑥로 들어온 전류는 모두 접촉면을 통해 빠져나간다.

맥스웰 스트레스 텐서(Maxwell stress tensor)를 τ , 자기장 벡터를 B라고 하였을 때 다음과 같이 나타낼 수 있다⁶⁾.

$$\tau = \frac{B^2}{2\mu} \quad (1)$$

$$B = \frac{\mu I(r)}{2\pi r} \quad (2)$$

여기서 μ 는 투자율(permeability)이고 온도가 큐리점 이상임으로 일반적으로 자유 공간(free space)에서 사용하는 $4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)을 사용할 수 있다. 전기장에 있는 도체에 작용하는 전자기력은 맥스웰 스트레스 텐서를 표면적분한 것과 같으므로 다음과 같이 표시된다.

$$F = \iint \tau \cdot dS \quad (3)$$

Fig. 2의 경계④에 작용하는 힘을 구하면 도체와 외부 경계에 작용하는 전자기력의 문제가 된다. 또한 경계④에 흐르는 전류의 크기가 일정하다고 가정하면 도체의 표면에 작용하는 자기장은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$B = \frac{\mu I}{2\pi r} \quad (4)$$

식(4)를 식(1)에 대입하여 (3)에서부터 경계④에 작용하는 체력(body force)을 구하면 다음과 같다.

$$F_a = \int_a^b \frac{\mu I^2}{4\pi r} dr = \frac{\mu I^2}{4\pi} \ln \frac{b}{a} \quad (5)$$

용융부와 고체부의 형상이 Fig. 2과 같이 되어있을 때 도체 내부에 작용하는 자기장은 다음과 같이 나타난다.

$$B = \frac{\mu r}{2nb^2} I \quad (6)$$

식 (6)을 식 (1)과 (3)에 대입하면 경계 ⑥에 작용하는 힘은 다음과 같다.

$$F_b = -\int_0^b \frac{\mu I^2}{4nb^4} r^3 dr = -\frac{\mu I^2}{16\pi} \quad (7)$$

위 결과들로부터 수직 방향으로의 전체 합력은 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$F = F_a + F_b = \frac{\mu I^2}{4\pi} \left[\ln \frac{b}{a} - \frac{1}{4} \right] \quad (8)$$

용접봉의 반경 b 와 모재와 접촉하는 면의 반경 a 에 따라 변하는 전체 합력의 방향을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 모재와 접촉하는 반경 a 가 반경 b 에 비하여 상대적으로 크기가 작을 경우에는 힘의 방향이 위로 작용하며 크기가 클 경우에는 아래로 작용하게 된다.

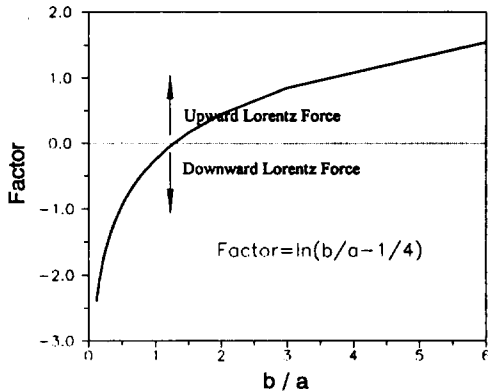
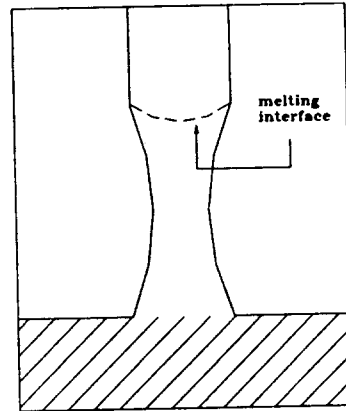


Fig. 3 Variation of Lorentz force factor, $\ln(b/a)$, with relative size of the droplet b/a

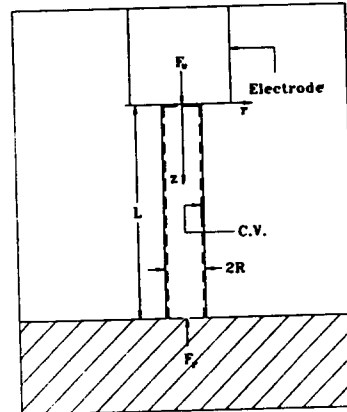
2.2 브리지의 파단과정 모델

시간 변화에 따른 브리지의 파단과정은 비선형적인 요소로 인하여 복잡한 현상이 수반된다. 따라서 본 모델링에서는 이와같은 복잡성을 피하기 위해서 아래와 같은 가정을 통해 단순화 시켰다.

(4) Fig. 4 (a)와 같은 일반적인 형태의 브리지



(a) Typical diagram of liquid metal bridge



(b) Model for calculation of liquid metal bridge

Fig. 4 Schematic diagram of liquid metal bridge

모양은 Fig. 4 (b)의 간단한 실린더 모양으로 나타낼 수 있다.

(5) 빠른 시간에 브리지의 파단이 일어나므로 브리지의 z -방향으로의 크기는 일정하다.

(6) 액체 상태의 브리지의 물성은 온도에 관계없이 일정하다.

(7) 브리지는 비점성, 비압축성 유동을 한다.

(8) 용적이 용융지와 초기에 접촉할 때 그 형태는 실린더형이다.

브리지 내부에 있어서 입자 유동의 r -방향의 속도 V_r 는 브리지 면의 이동 속도 R 에 선형적으로 비례한다고 가정하면 다음과 같다.

$$V_r = \frac{r}{R} R \quad (9)$$

축대칭이므로 $V_\theta = 0$ 이고 연속 방정식에서 다음

과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rV_r) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} (V_\theta) + \frac{\partial}{\partial z} = 0$$

$$V_z = -2 \frac{R}{R} z \quad (10)$$

브리지 유동의 운동에너지의 합은 다음과 같다.

$$W_k = \rho \int \frac{1}{2} (V_r^2 + V_z^2) dQ =$$

$$\frac{\rho \pi}{4} R^2 R^2 L + \frac{2\rho \pi}{3} R^2 L^3 \quad (11)$$

여기서 ρ 는 밀도, Q 는 브리지의 체적, $dQ = 2 \pi r dr dz$ 이다.

전류에 의하여 생기는 전자기력이 브리지의 외부면 및 유체 내부에 작용하는 일률의 전체 합 N_m 은 다음과 같다.

$$N_m = \int f_m V_r dQ = - \frac{\mu I^2}{4 \pi R} RL \quad (12)$$

여기서 단위체적당 전자기력 $f_m = \frac{\mu I^2 r}{2 \pi^2 R^4}$ 이다.

브리지와 용융지의 경계면에는 압력이 작용하고 있는데 이 힘은 브리지의 유동이 용융지로 이동하는 것을 방해한다. 브리지와 고체 용접봉 사이의 경계에 작용하는 힘은 식 (7)으로부터 다음과 같이 표시된다.

$$F_u = \frac{\mu I^2}{16 \pi} \quad (13)$$

브리지 부분을 관제역 (control volume)으로 잡고, Fig. 4(b)에서와 같이 브리지의 밑면에 작용하는 압력에 의한 합력을 F_r 이라 하면 이는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$F_u - F_r = \frac{\partial}{\partial t}$$

$$- \iint_{CS} \rho (V \cdot n) dA = 0 \quad (14)$$

$$F_r = F_u = \frac{\mu I^2}{16 \pi} \quad (15)$$

밑면에 작용하는 압력이 균일 분포라 가정하면 그 크기는 다음과 같다.

$$P_r = - \frac{F_r}{\pi R^2} \quad (16)$$

이 압력에 의한 일률을 구하면 다음과 같다.

$$N_r = \int P_r V_L dA = - \frac{\mu I^2}{8 \pi} \frac{R}{R} L \quad (17)$$

여기서 $V_L = -2 \frac{R}{R} L$, $dA = 2 \pi r dr$ 이다.

이상의 결과를 에너지 보존법칙에 적용하면 식 (12), (17)에서 다음과 같은 결과가 도출된다.

$$\frac{dW_k}{dt} = N_m + N_r \quad (18)$$

$$R = - \frac{R}{R^2 + \frac{8}{3} L^2} R^2 \frac{\mu I^2}{4 \rho \pi^2 (R^3 + \frac{8}{3} R L^2)} \quad (19)$$

위의 결과에서 브리지의 반경의 변화 과정을 구하기 위하여 전류, 브리지의 초기치 및 물성치를 알아야 한다. 전류는 측정된 값으로부터 접촉이 일어나는 부분에서 브리지의 파단이 완료되어 아크가 생성되는 직전까지를 대입하여 해를 구하였다. 대표적인 전류의 측정 결과는 Fig. 5과 같고 이중 점선 부분을 입력 값으로 하였다. 테일러 시리즈 (Taylor series)를 이용하여 브리지 반경의 변화 과정을 식 (19)에서 부터 다음과 같이 구할 수 있다.

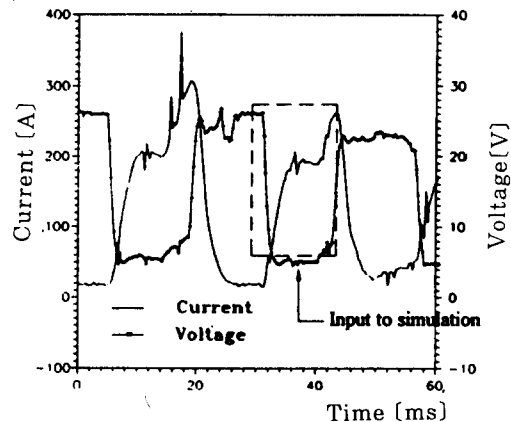


Fig. 5 Typical current and voltage waveform of short-circuiting welding

$$R(t + \Delta t) = R(t) + R \dot{t} \frac{\Delta t}{1!} + R(t) \frac{\Delta t^2}{2!} \dots \quad (20)$$

$$R(t + \Delta t) = R \dot{t} \frac{\Delta t}{1!} + \frac{dR(t)}{dt} \frac{\Delta t^2}{2!} \dots \quad (21)$$

여기에서 Δt 는 측정 주기이다.

접촉하는 순간부터 금속 이행이 시작되며 브리지가 축소되는 경향이 점점 커지므로 초기의 접촉하는 순간의 속도는 0이라 가정하였다. 전자기력의 크기가 도체의 반경에 의하여 크게 좌우되므로 브리지의 초기 크기에 따라 파단될때의 브리지 반경의 크기가 달라진다. 일반적으로 고속카메라의 측정에 의하면 와이어 직경이 1.2mm 경우 파단이

일어날 때 브리지 반경의 크기는 0.2-0.4 mm 정도이다⁵⁾. 이를 기초로 단락이 일어날 때의 브리지 초기반경을 구하기 위하여 파단현상이 나타나는 아크발생 직전까지의 전류값 및 파단이 일어나는 반경의 값 0.2mm (Case-1)와 0.4mm (Case-2)를 식 (19), (20), (21)에 적용하였다. 위의 과정을 통하여 파단이 0.2mm 및 0.4mm에서 일어날 경우 브리지 초기반경은 각각 0.77mm 0.87mm임을 알 수 있었다. 계산에 사용된 초기 값을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Fixed parameters and initial values used in calculation

Symbol	Meaning	Value
μ	Permeability [dyne/A ²]	$4\pi \times 10^{-2}$
ρ	Density of bridge [g/cm ³]	7.2
L	Length of bridge [mm]	2.5
$R_{t=0}$	Initial velocity for radius of bridge [mm/sec]	0
$R_{t=0}$	Initial radius of bridge [mm]	case-1:0.77 case-2:0.87

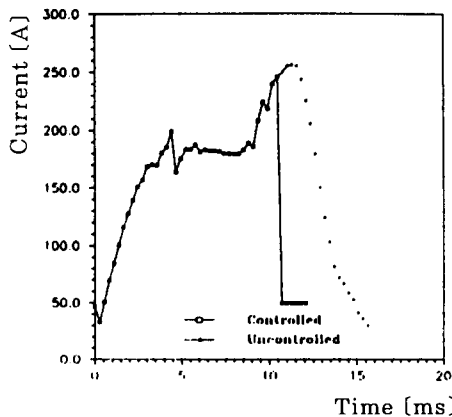


Fig. 6 Contolled and uncontrolled current waveform of short-circuiting welding

파형 제어의 효과를 검증하기 위하여 Fig. 6과 같이 측정된 값에서 아크발생 0.548msec전에 전류를 50A로 낮춤으로서 브리지의 크기가 얼마나 변하는가를 비교해 보았다. 제어된 파형에 의한 계산에도 아크의 발생 시점을 알고 이 시점까지를 입력값으로 계산해야 하므로, 우선 아크 발생점을 알아야 한다. 아크의 발생은 브리지 부분이 급속도로

기화됨을 의미한다. 전류에 의한 입열량을 고려하고 열 손실은 무시하였을 때 다음과 같은 미분 방정식을 세울 수 있다⁷⁾.

$$c\rho ALdT = \beta \frac{L}{A} I(t)^2 dt \quad (22)$$

여기서 c 는 비열 (specific heat), β 는 저항률 (resistivity), ρ 는 밀도 그리고 $A = \pi R^2$ 이다.

제어를 시작할 때의 시점을 t_0 , 온도를 T_0 , 측정된 전류에서 아크가 시작될 때의 시점을 t_1 , 온도를 T_1 이라 하고, 제어한 전류에서 아크가 시작될 때의 시점을 t_2 , 이때의 온도를 T_2 라고 할 때 각각의 시점에서의 브리지의 온도는 식 (22)에서부터 다음과 같이 나타내어진다.

$$T_1 = \frac{Rc}{c\rho\pi^2} \int_{t_0}^{t_1} \frac{I(t)^2}{R^4} dt + T_0 \quad (23)$$

$$T_2 = \frac{Rc}{c\rho\pi^2} \int_{t_0}^{t_2} \frac{I_c(t)^2}{R^4} dt + T_0 \quad (24)$$

여기서 $I(t)$ 는 제어하지 않은 경우 시간에 따른 전류값을 나타내며 $I_c(t)$ 는 용접파형을 제어한 경우 시간에 따른 용접파형을 의미한다.

T_1 , T_2 는 기화 온도이므로 $T_1 = T_2$ 가 성립되어 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\int_{t_0}^{t_1} \frac{I(t)^2}{R^4} dt = \int_{t_0}^{t_2} \frac{I_c(t)^2}{R^4} dt \quad (25)$$

브리지의 반경을 감소시켜 스파터의 발생을 억제하기 위해서 전류를 제어하는 경우, 브리지의 반경을 계산함에 있어서 아크의 시작점은 식 (25)을 이용하여 측정된 값으로부터 구하고 시작 t_2 까지의 전류 값인 50A는 식 (19), (20), (21)을 적용하여 브리지의 반지름의 크기를 구한다.

2.3 모델의 결과 및 고찰

용적이 용융지에 접촉하는 순간에 식 (8)에 의하면 z-축 방향으로 무한한 힘이 작용하지만 이 순간에는 아직도 아크가 존재하고 있고 접촉에 의한 전류의 통과는 무시할 만큼 적기 때문에 가정 (3)을 적용하여서는 안되고 실제의 힘은 아크의 상태를 고려하여야 한다. 접촉 면적이 증가하면서 기체 상

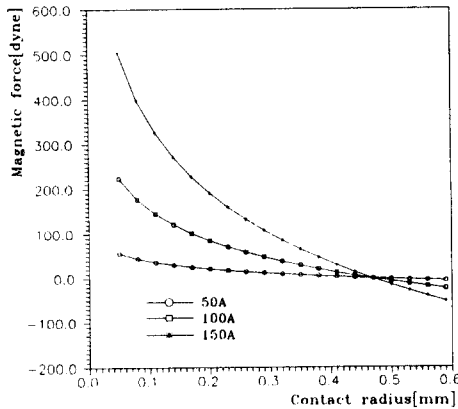


Fig. 7 Variation of magnetic force according to contact radius and current

태보다 전류 전도성이 높은 액체 상태로서의 전류 전도가 발생한다. 이때부터는 가정 (3)을 적용할 수 있으며, 식 (8)을 적용한 용융지와 용적의 접촉 정도와 전류 크기의 변화에 따른 전자기력의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 식에서도 알 수 있듯이 전류의 크기가 클수록 접촉 면적이 작을수록 z -방향의 체력이 크게 작용한다. 이 결과에 의하면 접촉이 시작될 때 전류의 크기가 크면 중력, 표면장력 등 접촉을 유지시키려는 힘보다 크게 작용하여 스파터를 발생시킬 수 있다. 고속 카메라를 이용한 스파터 발생 현상의 관찰에 의하면 스파터가 용적과 용융지가 접촉한 상태에서 용접봉의 축에 대하여 평행에 가깝게 비산되는 것이 관찰된다⁵⁾. 이것은 접촉 중에 작용하는 수직 방향의 전자기력 영향으로 생각된다. 용접봉의 공급으로 용적의 접촉 면적이 증가하면 구형의 브리지는 안정한 브리지로 모양이 바뀌는데 이때부터는 전자기력의 방향은 브리지를 분리시키는 방향으로 작용하고 금속 이행의 속도를 증가시키는데 도움이 되어 전류의 크기가 클수록 좋지만, 안정한 브리지가 생성되기 이전에 전류의 크기가 크면 용적과 용융지 사이에 접촉의 진행을 억제하여 안정한 용접 이행을 가져오기 힘들고, 불안정한 아크를 유발하여 다음 단계의 아크발생시에 악 영향을 미쳐 스파터를 일으킬 가능성이 높아진다⁶⁾. 위의 결과를 종합하면 접촉의 시작은 낮은 전류에서 유도되어서 안정한 브리지가 생성되기 전까지 유지시키었다가 그 이후로 전류를 높여서 아크를 유도하면 스파터를 줄이

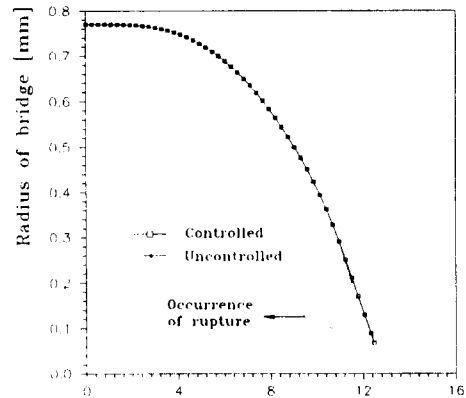
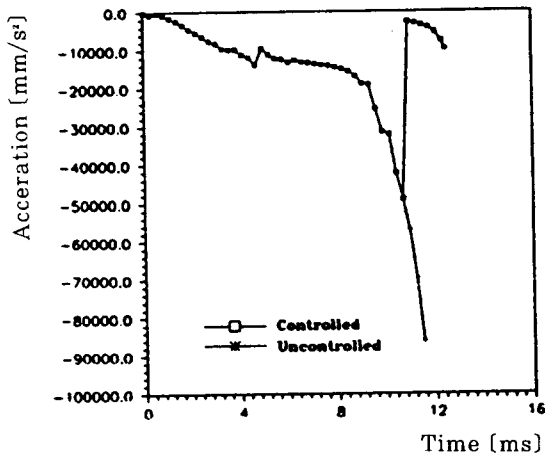


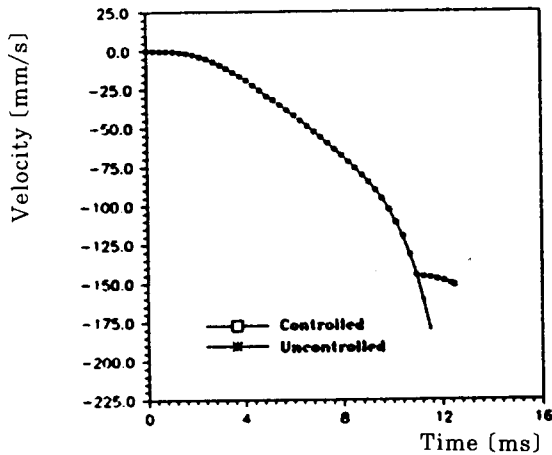
Fig. 8 Variation of bridge radius for controlled and uncontrolled current waveform (Case-1)

고 안정한 금속 이행을 유도할 수 있다.

브리지 파단 과정의 모델의 결과를 살펴보면 다음과 같다. Case-1은 브리지의 초기반경이 0.77mm인 경우 제어하지 않은 용접파형과 아크가 발생되기 0.548msec 전에 용접전류를 50A로 낮추는 제어를 수행한 경우의 시간 변화에 따른 브리지 반경변화를 의미하며 이를 Fig. 8에 나타내었다. 금속이행현상을 기준으로 하여 용접파형을 제어한 경우 제어하지 않은 경우에 비해 아크가 일어나기 직전까지의 입열량이 작으므로 파단이 늦게 일어나게 된다. 이시점의 시간은 식 (25)로부터 구할 수 있으며 파단시의 반경은 앞에서 언급한 바와 같이 식 (19), (20), (21)에 의해 구할 수 있다. 용접파형을 제어하지 않은 경우 파단반경은 0.2mm이며 제어된 용접파형의 경우는 반경 0.07mm에서 파단이 일어난다. 반경이 줄어드는 경향을 알아보기 위해서 반경의 진행 가속도를 Fig. 9(a)에 속도를 Fig. 9(b)에 나타내었다. Fig. 9에 나타난 바와같이 전류를 제어하는 경우의 반경 가속도는 용접전류를 50A로 낮추는 시점에서 상당히 감소되며, 속도의 경우 위의 시점에서 전류를 제어하지 않는 경우보다 진행속도가 감소됨을 알 수 있었다. 따라서 용접전류를 아크가 발생하기 직전에 낮추는 제어를 행할 경우 브리지반경의 감소 진행속도가 용접전류를 제어하지 않는 경우보다 작으므로 아크발생까지 걸리는 시간이 많이 걸림을 알 수 있다. Case-2는 브리지의 초기반경이 0.87mm인 경우 제어하지 않은 용접파형과 아크가 발생하기 0.



(a) Acceleration for radius of bridge



(b) Velocity for radius of bridge

Fig. 9 Acceleration and velocity for radius of bridge

548msec 전에 용접전류를 50A로 낮추는 제어를 수행한 경우의 시간 변화에 따른 브리지 반경변화를 의미하며 이를 Fig. 10에 나타내었다. 용접파형을 제어하지 않은 경우 파단반경이 0.4mm이며 제어된 파형에서는 0.16mm에서 파단이 일어남을 알 수 있다. 전류를 감소시키면 반경의 진행 가속도의 값이 상당히 감소되는 반면 반경의 진행 속도는 이미 상당히 큰 값에서 조금씩 증가한다. Case-1은 전류값을 50A로 감소시키었기 때문에 아크 발생까지 걸리는 시간은 제어하지 않는 파형보다 0.96msec 후에, Case-2의 경우는 2.08msec 후에 아크가 발생한다. 이 시간의 영향 때문에 브리지의 반경의 감소 속도는 전류를 제어하는 경우가 일반

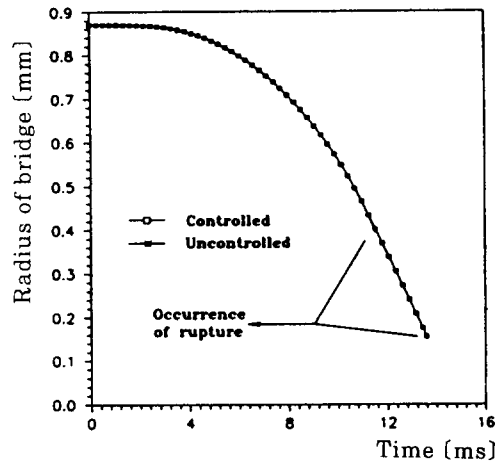
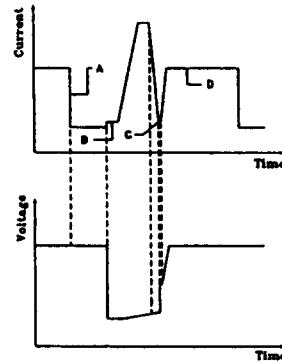


Fig. 10 Variation of bridge radius for controlled and uncontrolled current waveform (Case-2)



A : Current drops by the power source characteristics
 B : Current rise is delayed so as not to affect magnetic force
 C : Separation has occurred at low current to stabilize metal bridge
 D : Period of high arc current where the electrode is quickly melted

Fig. 11 Current and voltage waveform control in short-circuiting welding

적인 경우보다 느리지만 파단이 완결될 때 까지 진행이 계속되어서 Case-1은 0.35, Case-2는 0.4배로 일반적인 경우보다 브리지의 크기가 작다. 이 모델의 경우 브리지 전체를 같은 온도로 가정하였기 때문에 일제히 기화되면서 아크가 발생하는 것으로 나타나지만, 실제로는 용융지와 브리지의 접촉부 근처에서 아크가 발생하기 시작한다. 접촉부가 기화되면서 파단이 발생하면 나머지 금속중 대부분은 용융지로 전달되지만 일부는 기화로 인한 폭발로 인해 스패터로 비산된다. 일반적으로 파단될때의 브리지반경의 크기가 작으면 아크 발생시 스패터로 비산될 금속의 양과 크기가 작아서 발생

되는 스패터의 양이 상당히 감소되리라 기대된다. 아크가 발생할 때의 전류를 감소시킨 후 발생 후에도 계속 유지하고 있으면 입열량이 적어서 용접성에 문제를 일으킨다. 그러므로 안정된 용접이행현상을 구현하기 위해서는 아크 발생 직전에 전류를 감소시켜 전류 값이 낮은 상태에서 아크가 유발되게 한후 전류를 다시 높여 아크를 안정화 시킨 후 일정 시간이 지난 다음 다시 단락이행을 유도해야 한다. 위의 결과와 전절의 결과를 바탕으로하여 스패터를 감소시키기 위해 제어되어야 할 용접기 파형의 모양을 Fig. 11에 나타내었다.

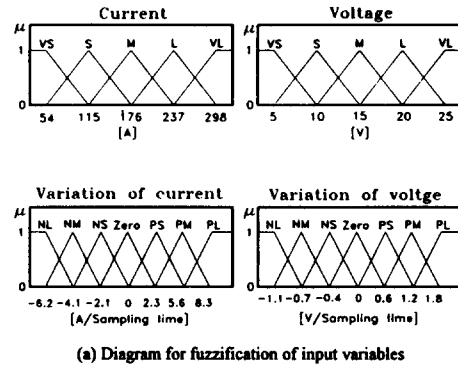
3. 파형 제어를 위한 이행 현상의 예측

용접현상은 보호가스의 종류, 사용하고자 하는 용접조건 그리고 그에따른 금속이행현상등의 많은 비선형적인 요소와 복잡성을 내포하고 있다. 이로 인하여 측정되는 용접신호는-용접기의 특성에 따라 다르지만- 어느정도 약간의 노이즈를 포함하게 된다. 앞절에서 제시한 모델링을 실제로 적용하기 위해서는 단락이 일어날 때와 아크가 발생하기 직전의 상태를 미리 예측해서 각각의 상태에서 적절한 파형제어를 구현해야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해서 비선형적인 특성을 표현할 수 있고 또한 예측특성을 갖는 퍼지 이론을 용접이행현상의 예측방법에 적용하고자 한다.

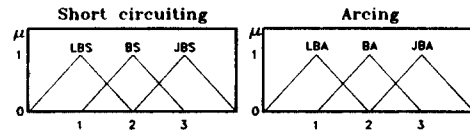
3.1 퍼지이론의 적용

3.1.1 선정된 변수들의 퍼지화 (fuzzification)

우선 퍼지 논리를 적용하기 위하여 명확한 값으로 측정된 입력 변수도 적절한 퍼지 값으로 바꾸어야 한다. 측정된 값이 주기적으로 유사한 특성을 보이나 용접 현상에 따라 조금씩 다른 경향을 나타내므로 본 연구에서는 Fig. 12와 같은 삼각 퍼지 숫자를 사용하였다⁸⁾. 입력 변수로는 측정된 시점에서의 전류, 전압 그리고 전류와 전압의 측정 주기당 변화량으로 정하였으며 측정된 신호마다 적절한 퍼지 집합과 소속 함수 값을 갖도록 하였다. 단락이 일어날 때와 아크가 발생하기 직전을 예측하



(a) Diagram for fuzzification of input variables



(b) Diagram for fuzzification of output variables

Fig. 12 Diagram for fuzzification of input/output variables

기 위하여 결론부의 퍼지 함수를 다음과 같이 나타내었다.

- LBS : Long Before Short circuiting, BS : Before Short circuiting
- JBS : Just Before Short circuiting
- LBA : Long Before Arcing, BA : Before Arcing
- JBA : Just Before Arcing

3.1.2 룰 베이스 (rule base) 설계 및 추론 (inference)

스패터를 줄이기 위하여 제어하는 구간은 단락의 시작점과 아크의 발생 직전이므로 퍼지 추론은 4개의 변수에 대한 퍼지화된 값으로부터 얻은 입력중 단락과 아크 발생에 대하여 예측하도록 하였다. 단락이 시작되면 전압의 강하가 급격히 생기는 특징이 있으므로 이 현상을 고려하여 그때의 전류 크기의 정도 및 전압 크기의 정도를 기초로 하여 퍼지 추론 규칙을 세웠다. 아크의 발생 직전에는 전압이 급증하기 시작하므로 전압의 기울기를 추론 규칙에 크게 반영하여 아크 발생 직전을 예측하도록 하였다. 여기서 사용된 룰 베이스 및 추론

방법은 최대-최소(maximum-minimum) 연산을 사용하였으며 이는 다음과 같다⁹⁾.

R_i : IF current(I) is Λ_1 and voltage(V) is Λ_2
and variation of current (ΔI)
is Λ_3 and variation of voltage (ΔV) is Λ_4
then arcing(AR) or short-circuiting(SH) is Λ_5
여기서 R_i 는 룰 베이스를 나타내고 Λ_1 - Λ_5 는 각각의 상태를 의미한다.

$C = \max(R_i(I, V, \Delta I, \Delta V, AR, SH) \wedge X(I) \wedge Y(V) \wedge Z(\Delta I) \wedge W(\Delta V))$

여기서 C는 추론결과를 나타내고 X(I), Y(V), Z(ΔI), W(ΔV)는 각각의 입력값을 의미한다.

4가지 입력 값에 대하여 최고 16개의 출력이 나올 수 있으며 출력의 값이 중복될 경우는 연산을 하여 최대 값이 선정되도록 하였다.

3.1.3 비퍼지화 (defuzzification)

출력 값을 제어 입력이나 추론의 비교 지수가 되도록 하려면 출력 값이 하나의 합성으로 이루어지도록 하는 것이 좋다. 본 연구에서는 비퍼지화 방법으로 무게중심법(center of gravity)을 사용하였으며, 이는 합성된 출력 퍼지집합의 무게중심을 구하여 이에 해당하는 값을 출력으로 사용하고자 할 때 사용할 수 있다.

3.2 결과 및 고찰

측정한 전류, 전압의 파형으로부터 이행 현상을 예측한 결과를 Fig. 13에 나타내었다. 단락의 예측은 정확한 시점에서 이루어 졌으며 또한 아크가 발생하기 직전의 시점도 정확히 예측되었다. 특히 아크가 발생하기 직전의 상태는 스파터의 양과 직접적인 관련이 있으므로 이를 예측하는데 더 큰 주안점을 두었다. 아크가 발생하기 직전에 전류를 내림으로서 스파터의 양을 줄이고 또한 미소한 시간 지연 후에 불안한 아크를 안정화 시킬수 있도록 전압과 전류값을 어느정도 올려주어야 한다. 이러한 과정을 통하여 모델링에 기초를 둔 용접파형제

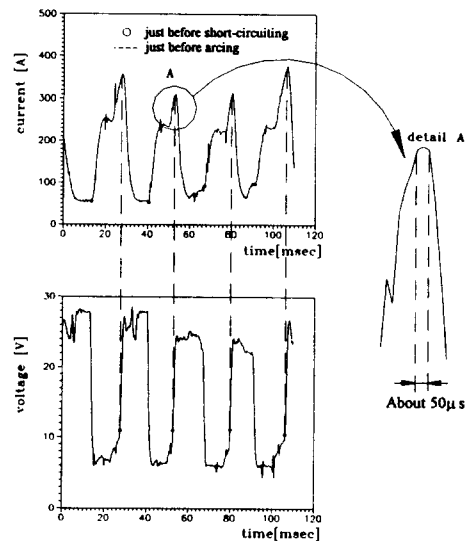


Fig. 13 Prediction of time for JBA(Just Before Arcing) and JBS(Just Before Short-circuiting)

어를 구현할 수 있으리라 사료되며 이를 직접 용접기에 적용할 경우에는 용접기의 하드웨어에 따라 적절한 파형제어 알고리즘이 필요하리라 생각된다.

4. 결 론

지금까지 단락 아크 용접에서 스파터의 발생 과정과 스파터의 감소를 위한 파형 제어의 방법에 관하여 살펴보았다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

단락 아크 용접에서 단락 시작후 용접에서 브리지로 변화 과정 중의 전자기력을 분석한 결과에 의하면 단락의 시작부터 와이어의 공급으로 안정한 브리지가 생성되기까지 전류를 낮은 상태에서 유지되도록 하여 전자기력의 영향에 의한 스파터의 발생을 줄일 수 있으리라 사료된다. 또한 아크 발생까지 브리지 크기의 변화를 모델링하여 전류의 제어에 의한 브리지 변화 과정을 시뮬레이션 하였는데, 그 결과에 의하면 아크 발생 직전 전류를 낮추어 낮은 전류에서 아크를 유도하면 아크 발생시의 브리지의 크기가 작아지고 아크발생시의 기화

로 인한 폭발의 크기도 작아져서 스패터를 감소시킬 수 있을것으로 사료된다. 이러한 모델링을 기반으로 하여 단락의 시작과 아크 발생의 시점을 예측하는데 퍼지 이론을 적용하였는데, 이방법을 실제 용접기의 파형제어에 적용하면 스패터 감소에 효과가 있으리라 사료된다.

참 고 문 헌

1. A. G. Potapevskii : Types of metal spatter in CO₂ welding, *Automatic Welding*, No. 5, (1974), pp. 10-12
2. I. S. Pinchuk : Reducing spatter in short circuit welding by restricting the explosion energy of a bridge, *Welding production*, No. 11, (1976), pp. 52-54
3. I. I. Zaruba : Mechanism of metal spatter during arc welding, *Automatic welding*, No. 11, (1970), pp. 10-14
4. I. S. Pinchuk : Stabilization of transfer and methods of reducing the spattering of metal in CO₂ welding with a short arc, *welding production*, No. 6, (1980), pp. 12-14
5. V. A. Bukarov and S. S. Ermakov : Dynamics of energy characteristics of the arc in consumable electrode short-circuiting welding, *Welding International*, Vol. 7, No. 2, (1993), pp. 129-133
6. J. F. Lancaster : *The Physics of welding*, Pergamon press, (1984), pp. 43-51
7. W. G. Chace and H. K. Moore, *Exploding Wires*, Plenum press, pp. 271-279
8. 이광형, 오길록, *퍼지 이론 및 응용*, 홍릉과학출판사, 1991, pp. 5. 1-5. 80
9. C. C. Lee : Fuzzy Logic in Control Systems, Fuzzy Logic Controller-Part I, IEEE Trasaction on System, Man, and Cybernetics, Vol. 20, No. 2, (1990), pp. 404-418