研究論文

용융부의 형상을 고려한 GMA 용접 공정의 금속이행 모델링

이강희* · 최상균* · 유중돈**

Modeling of Metal Transfer in GMA Welding Process

K.H.Lee*, S.K.Choi* and C.D.Yoo**

Key Words : Metal Transfer(금속이행), Molten Drop Geometry(용융방울 형상), Energy Minimizing Method(에너지 최소화 방법), Maxwell Stress(맥스웰 스트레스), Critical Current(임계전류)

Abstract

As the metal transfer in the GMAW process affects the weld quality and productivity, the mechanism of molten drop formation and detachment has been investigated at various welding conditions. The force balance and pinch instability models have been widely used to analyze the metal transfer in the globular and spray modes, respectively. A new approach is proposed in this work by minimizing the energy of molten drop system. Effects of the surface tension, gravity, electromagnetic and drag forces are considered with no presumed molten drop geometry. Effects of various welding conditions on the metal transfer are explained. The results show that the proposed model can be applied to the globular and spray transfer modes. When compared with other models, results of the proposed model show better agreements with the available experimental data, which demonstrates the validity of the present model.

1. 서 론

가스 금속 아크(Gas Metal Arc) 용접 공정에서의 금속이행(metal transfer)은 아크 및 저항열에 의하여 용융된 용접봉이 아크를 통해 모재에 이행하는 현상으로, 용접 금속부의 질과 생산성에 큰 영향을 끼친다[1]. 금속이행의 형태는 단락(short-circuiting), 입상용적(globular) 및 스프레이(spray) 모드(mode)의 세가지로 분류된다. 단락 이행 모드는 용접봉과 모재가 단락하여 용융부가 이행되며, 입상용적 이행 모드는 저전류 영역에서 용접봉의 직경보다 큰 용적(droplet)이 낮은 주파수로 이행된다. 스프레이 이행 모드는 고전류 영역에서 용

* 학생회원, 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과
** 정회원, 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과

접봉의 직경보다 작은 용적이 높은 주파수로 이행된다. 금속이행은 용접전류, 전극 돌출길이(electrode extension), 분위기 가스등의 용접조건에 영향을 받으며, 각 모드에 따라 아크의 안정성, 용입깊이, 스패터 발생량 등이 변화한다. 이러한 금속이행 현상에 대한 중요성으로 인해, 용융부의 형상이나 용융방울의 이탈 과정을 규명하기 위한 모델링을 통한 연구가 이루어져 왔다. 본 연구는 금속이행의 형태중에서 입상용적 및 스프레이 모드를 모델링을 통하여 해석하고자 한다.

현재까지 진행되어 온 대표적인 이론적 연구로는 static force balance 이론[2,3]과 pinch instability 이론[4,5]을 들 수 있다. Static force balance 이론에 의거한 모델에서는 용융부의 형상을 구로 가정하고 여기에 작용하는 용접봉 길이 방향의 힘들의 평형 조건에서 용융 방울의 이탈을 설명하고 있다. 이 때 액체 금속의 표면장력은 유지력(attaching force)으로, 중력과 drag force는 이탈력(detaching force)으로 놓고 계산한다. 전자기력은 아크가 덮인 면적에 따라 유지력 혹은 이탈력으로 작용한다. 이 방법은 용융부의 형상을 용접봉의 지름보다 큰 구로 고정시켰기 때문에 스프레이 모드에는 적용할 수 없으며, 용접봉의 길이 방향의 힘만을 고려하고 반지름 방향의 힘(pinch force)에 의한 영향은 고려하지 않았다. Pinch instability 이론에 의한 모델은 용융부의 형상을 실린더로 가정하고 여기에 perturbation을 주어 임계조건을 해석하는 것으로 스프레이 모드의 해석에 사용되고 있다. 그러나 이 모델은 용융부의 형상이 용접봉의 직경과 같은 실린더로 고정되어 있으므로 입상용적 모드에는 적용할 수 없으며 용융부의 반지름 방향에 작용하는 힘들에 의한 핀치 효과만을 고려하기 때문에 길이 방향의 힘에 의한 영향은 고려할 수 없다. 앞에서 설명한 두가지 모델들은 일반적으로 고정된 형상을 미리 가정하였으므로 다양한 금속이행 모드에 적용하기엔 어려움이 따른다. 최근에 이러한 단점을 보완하여 용융부의 형상 변화를 고려하고 입상용적과 스프레이 모드에서 적용이 가능한 에너지 최소화 방법에 의한 해석이 진행되었다[6]. 에너지 모델에서는 용융부에 작용하는 모든 방향의 힘들을 고려하고, 이 힘들에 의한 에너지들의 총합을 최소화 시키는 조건으로 용융부의 형상 및 이탈조건을 결정한다. 본 연구에서는 기존의 에너지 방법을 보완하여 정적 평형상태(static equilibrium)에서 용접조건에 따른 용융부의 형상 및 이탈조건을 계산하였다. 용융부에 작용하는 힘들로는 표면장력, 중력, 전자기력과 drag force에 의한 영향을 고려하였다. 전자기력에 의한 에너지 계산을 위하여 Maxwell stress를 이용하였다. 또한 용접전류, 용융부의 부피, 아크가 덮인 면적 등의 용접조건들을 변화시키면서 이에 따른 용융부의 형상과 이탈조건을 구하였다.

2. 에너지 모델에 의한 해석

2.1 용융부의 형상 및 변위

용융부의 초기 형상은 Fig. 1a에 보이는 바와 같이 n개의 실린더 요소(circular slab)들로 구성하였다. 초기 상태에서의 각 요소의 반지름과 길이는 a_o와 L_o이며, 요소 반지름 a_o는 용접봉의 반지름과 동일하다. 용융부에 힘이 작용하여 변형이 이루어진후의 형상은 Fig. 1b와 같이 경사진 요소(tapered cylinder)로 가정하였다. i번째 요소는 윗면의 반지름 a_{i-1}과 아랫면의 반지름 a_i, 그리고 길이 L_i로 그 형상이 결정된다. 변형 전후 각 요소간의 부피 보존 조건을 만족시키기 위한 요소의 초기 길이 L_o와 변형 후의 길이 L_i와의 관계는 다음과 같다.

$$L_i = \frac{3a_o^2 L_o}{(a_i^2 + a_i a_{i-1} + a_{i-1}^2)} \qquad (1)$$

용융부에 작용하는 힘에 의한 에너지를 계산하기 위하여 변위(displacement)를 구하여야 한다.

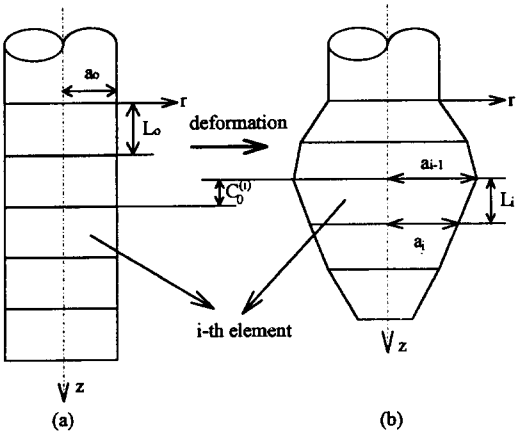


Fig. 1 Discretization of molten tip by slabs
(a) initial shape (b) deformed shape

부피보존 조건과 경계조건을 만족시키는 어떠한 함수도 변위로 사용이 가능하다. 본 연구에서 사용한 i번째 요소에서의 r과 z방향의 변위식은 다음과 같다.

$$u_r^{(i)} = r\left[1 - \frac{a_0 L_i}{(a_i - a_{i-1})z + a_{i-1}L_i}\right] \quad (2)$$

$$u_z^{(i)} = C_0^{(i)} + \left(\frac{L_i - L_0}{L_i}\right)z \quad (3)$$

$$C_0^{(i)} = \sum_{k=1}^{i-1} L_k - L_0(i-1) \quad (4)$$

여기에서 $C_0^{(i)}$는 첫번째 요소에서 (i−1)번째 요소까지의 z방향으로의 누적된 변위값이다.

2.2 시스템 에너지

평형상태에서 용융부에 작용하는 표면장력, 중력, 전자기력, drag Force들의 영향에 의한 전체 에너지식은 다음과 같다.

$$E_{total} = -E_{st} + E_g + E_{em} + E_d \quad (5)$$

각 에너지들은 변형후 각 요소의 형상을 결정짓는 반지름 a_i들로 표시된다. 용융부의 형상은 시스템의 전체 에너지를 최소화 시키는 조건으로 결정되며 그 조건은 다음과 같다.

$$\frac{\partial E_{total}}{\partial a_i} = 0, \qquad (i = 1, \cdots\cdots, n) \quad (6)$$

식(6)부터 n개의 연립방정식을 얻을 수 있으며, 이 연립 방정식의 근들을 가지고 변형이 이루어진 후의 용융부의 형상을 결정짓는 각 요소의 반지름을 구할 수 있다. 본 연구에서는 이 근들을 수치적으로 구하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 사용하였다[7].

2.3 에너지식

용융부에 작용하는 에너지를 구하는데 사용되는 재질의 특성인 표면장력, 밀도, 점도 등은 상수로 가정하였고, 전체 시스템 에너지는 각 요소의 에너지 합으로 구한다. 표면장력 에너지 E_{st}는 표면장력 γ를 용융부 전체 표면에 대해 적분한 값으로 표시되며 요소로 나눈 경우에는 총합(summation) 형식으로 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{st} = \int_A \gamma \ dA = \gamma \sum_{i=1}^{n} A^{(i)} \quad (7)$$

이 때, $A^{(i)}$는 i번째 요소의 옆면적이며 n번째 요소에서는 바닥면적이 포함된다.

중력 에너지 E_g는 다음과 같이 나타내어진다.

$$E_g = \int \rho \, \bar{g} \cdot \bar{u} \ dV = \rho g \sum_{i=1}^{n} (u_z^{(i)} \ V^{(i)}) \quad (8)$$

이 때, ρ는 용접봉의 밀도, g는 중력 가속도, $V^{(i)}$는 i번째 요소의 부피이다.

전자기력은 용접전류와 이 전류에 의해 유도되는 자기장에 의하여 발생한다. 경사진 실린더 형상인 요소에 작용하는 전자기력을 구하기 위하여 연속방정식과 경계조건을 만족시키는 전류밀도를 구하여야 한다. 이와 같은 조건을 만족시키는 전류밀도식을 구하는 것은 상당히 어렵기 때문에 본 연구에서는 Maxwell stress를 이용하여 에너지를 구하였다. Maxwell stress, τ는 Fig. 2에서 나타난 바와 같이 전체 용융부의 표면에 대하여 surface normal vector, $\bar{n}$의 반대 방향으로 작용한다. Maxwell stress를 이용하면 부피적분에서 표면적분으로 바꿀 수 있으며, 다음과 같이 유도된다[8].

$$\int_V \bar{F}_m \ dV = \int_V \bar{J} \times \bar{B} \ dV = \int_s \left(\frac{B^2}{2\mu_0}\right)(-\bar{n}) dS \quad (9)$$

이 때, J와 B는 전류밀도와 자속밀도이며, μ_0는 permeability를 나타낸다.

전도체에서 Maxwell stress, τ를 표면에 대하여 적분한 로렌쯔 힘에 의한 전자기력 에너지 E_{em}은 다음과 같다.

$$E_{em} = \int_s \tau \, \bar{n} \cdot \bar{u} \ dS, \qquad \tau = -\frac{B^2}{2\mu_0} \quad (10)$$

식(10)을 z방향과 r방향으로 나누어 앞에서 구한 변위식 u_z, u_r을 적용하면 전자기력에 의한 에너지식은 다음과 같다.

$$E_{em,z} = -\frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \sum_{i=1}^{n} \left[\left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_k - \frac{\alpha_i}{2}\right)^2 \right. \quad (11)$$

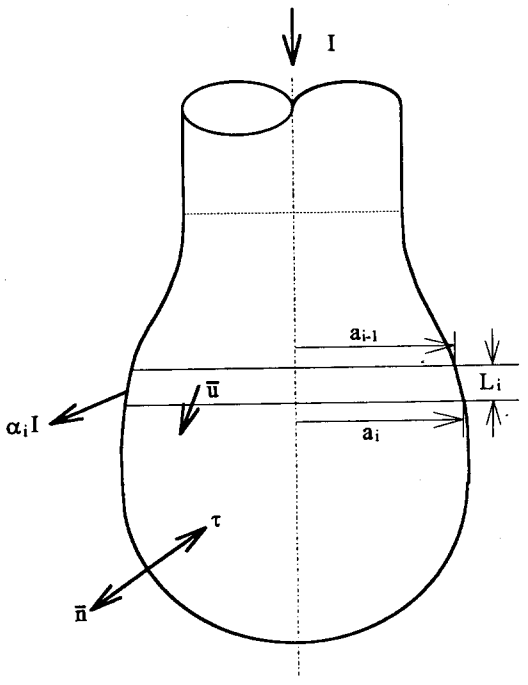


Fig. 2 Maxwell stress acting on the molten drop

$$\left\{ c_0^{(i)} - \frac{a_{i-1}(L_i - L_o)}{a_i - a_{i-1}} \ln\left(\frac{a_{i-1}}{a_i}\right) - L_i + L_o \right\} \Big] \tag{12}$$

$$E_{em,r} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \sum_{i=1}^{n} \left[\left(1 - \sum_{k=1}^{i-1} \alpha_k - \frac{\alpha_i}{2} \right)^2 \left\{ L_i + \frac{a_o L_i}{a_i - a_{i-1}} \ln\left(\frac{a_{i-1}}{a_i}\right) \right\} \right]$$

일반적으로 용융부 표면의 아크의 분포는 복잡한 현상으로 별도의 연구가 필요하다. 본 연구에서는 아크의 분포가 알려져 있다고 가정하고 이에 따른 용융부의 형상을 살펴 보았다. 용융부 표면에서의 전류밀도 분포를 조절하기 위하여 Fig. 2에서 보는바와 같이 전류소모계수 α_i를 도입하였다. 전류소모계수는 전체전류중 i번째 요소의 벽면을 통해 아크로 나가는 전류의 비를 나타낸다 ($\sum_{i=1}^{n} \alpha_i = 1$). 전류소모계수를 조절하여 균일한 전류분포, 혹은 선형적으로 변하는 전류분포 등을 설정할 수 있다. 아크가 덮여 있지 않은 경우는 α_i를 0으로 놓는다.

Drag force에 의한 에너지 E_d는 drag 계수, 가스밀도, 가스속도가 상수라고 가정하면 다음과 같다[9].

$$E_d = \frac{1}{2} \int C_d \rho_g v_g^2 u_z \, dA_p = \frac{1}{2} C_d \rho_g v_g^2 \sum_{i=1}^{n} u_z^{(i)} A_p^{(i)} \tag{13}$$

이 때, C_d는 drag 계수, ρ_g는 가스밀도, v_g는 가스속도, A_p는 투영면적 (projected area)을 나타낸다. A_p가 투영면적이므로 drag force에 의한 에너지는 변형 후의 용융부의 반지름이 초기 용융부의 반지름보다 더 커지는 요소에만 작용하며, 요소의 밑면 반지름이 윗면 반지름보다 더 작은 요소에는 영향을 미치지 않는다고 가정하였다. 따라서, 스프레이 모드에서는 투영면적이 0이므로 drag force에 의한 영향을 고려하지 않는다.

식(13)에서 쓰인 drag 계수 C_d는 원통이나 구의 형상에 대한 실험값을 curve-fitting하여 구한다[10,11]. 본 연구에서 구한 용융방울의 형상은 입상용적 모드에서는 구의 형상과 유사하므로 구에 대한 C_d를 사용하였다. 구의 형상에 대한 drag 계수는 레이놀즈수(Reynolds number) R_e에 의한 함수이며 다음과 같다.

$$C_d = \frac{24}{R_e} + \frac{6}{\sqrt{1+R_e}} + 0.4 \tag{14}$$

$$\left(R_e = \frac{\rho_g v_g d}{\mu}, \quad 0 < R_e < 200000 \right)$$

여기에서 d는 용융부의 지름, 그리고 μ는 가스 점성계수 이다. 본 연구에서는 최대 요소지름으로 구한 C_d값을 각 요소들에서 drag force의 영향에 의한 에너지를 구하는데 사용하였다.

3. 결 과

본 연구에서는 용접조건이 용접부의 형상과 이탈에 미치는 영향을 에너지 모델을 이용하여 계산하였다. 용접조건은 용접전류, 용융부의 부피, 아크가 덮인 면적 등이며, 해가 발산하는 경우 평형이 깨어지고 용융부가 이탈하는 것으로 가정하였다. 용접봉의 재질로는 연강, 분위기 가스는 아르곤일 때의 물성치를 계산에 사용하였다(Table 1). 용융

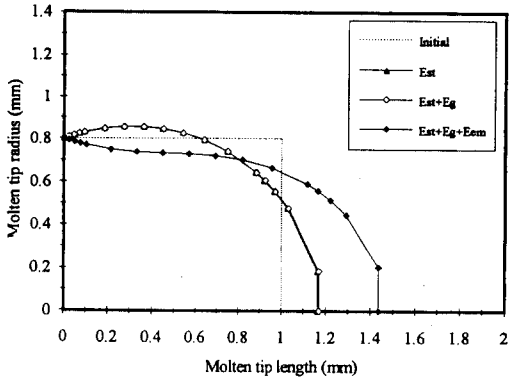
Table 1. Material properties

Parameter	Value
ρ	7800(kg/m^3)
γ	1.2(N/m)
ρ_g (argon)	0.06(kg/m^3)
V_g	$20.4+0.37I+0.0004344I^2$
μ (argon, 8000K)	2.56×10^{-4}(kg/ms)
μ_0	$4\pi\times10^{-7}$ (N/A^2)

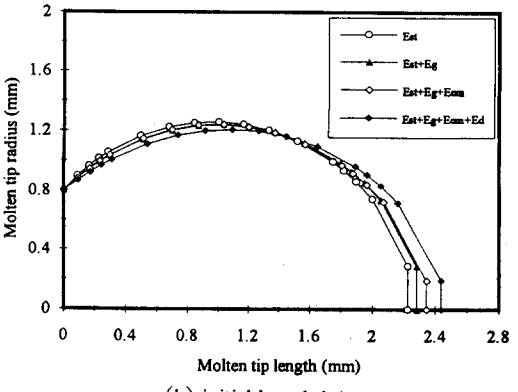
부의 초기 반지름 a_0는 0.8 mm로 고정시켰고(용접봉의 지름 : 1.6 mm), 초기 길이는 0.5 mm에서 10 mm까지 변화시켜 가면서 그에 따른 형상을 구하였다. 형상해석은 전체를 같은 부피를 갖는 10개의 요소로 나눈 후, 형태 변화가 심할것으로 예상되는 처음과 마지막 요소를 다시 4개로 나눈, 전체 16개 요소에 대하여 수행하였다.

초기 길이를 고정시키고 용융부에 작용하는 각각의 힘들에 의한 영향을 변화시키며 형상의 변화를 구하였다(Fig. 3). 이 때, 아크는 용융부 전체에 균일하게 덮여 있고, 전류를 증가시켜 해가 발산하기 직전의 임계 전류값에서 형상을 구하였다. Fig. 3a와 3b는 초기 길이가 각각 1, 4 mm인 경우를 나타낸다. 일반적으로 표면장력에 의한 에너지만을 고려하였을 때에는 형상이 구를 이루었으나, 여기에 중력, 전자기력, drag force에 의한 영향이 하나씩 첨가되어 나가면서 길이 방향으로는 더 늘어나고 반지름 방향은 줄어드는 형상을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 3a(초기 길이 : 1 mm)에서 전류가 329A인 경우, 용융부의 반지름이 용접봉의 반지름보다 작기 때문에 drag force에 의한 영향은 무시되고, 스프레이 모드를 나타낸다. Fig. 3b(초기 길이 : 4 mm)에서 중력에 의한 영향이 증가하고, 전류를 증가시킬 때 해가 발산하지 않는 전류값은 138A이며, 용융부의 지름이 용접봉의 지름보다 큰 입상용적 모드를 나타낸다. 이와 같은 임계 전류값 이상으로 전류를 증가시키면 평형이 깨어지며 해가 발산하게 된다. 임계 전류값 이상에서는 불안정(instability)이 발생하여 용융부가 용접봉에서 이탈하는 것으로 추정된다.

용융부의 초기 부피가 변형후의 형상에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. 표면전체에 아크가 균일하게 덮여있을 때, 모든 힘들에 의한 에너지를 고려하고 전류를 증가시켜 평형이 깨어지는 임계



(a) initial length : 1mm



(b) initial length : 4mm

Fig. 3 Comparison of molten tip shape for various acting forces

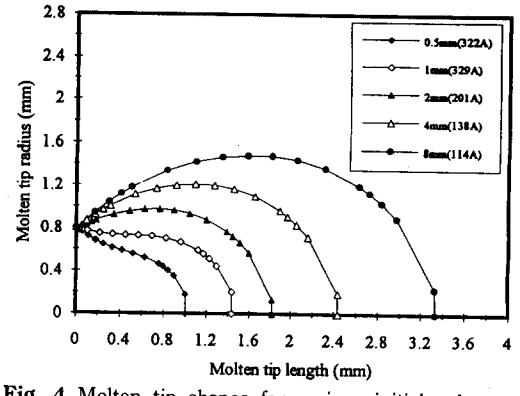


Fig. 4 Molten tip shapes for various initial volumes

전류값에서의 형상을 구하였다. 이 때의 초기길이별 임계전류값은 0.5, 1, 2, 4, 8 mm일 때 각각 322, 329, 201, 138, 114A 이다. 초기 길이가 작을수록

전류를 높일 수 있으며, 스프레이 모드에서의 형상을 보이고, 초기 길이가 증가하면 임계전류값이 낮아지고 입상용적 모드에서의 형상을 나타낸다.

아크가 덮인 면적을 조절하면서 이것이 용융부의 형상에 미치는 영향을 Fig. 5, 6에 나타내었다. Fig. 5는 초기 길이가 1 mm인 경우, 아크가 덮인 면적이 용융부 말단에서부터 40, 70, 100% 일때, 변형후의 용융부 길이를 전류별로 나타낸 결과이다. 그림에서와 같이 아크가 덮인 면적이 작을수록 임계전류값은 작았고, 같은 전류값에서 변형도가 더 극심함을 알 수 있다. 그러나 아크가 덮인 면적이 클수록 임계 전류값이 증가하여 임계 전류값에서의 변형도는 100%일 때 가장 크게 나타나고 있다. Fig. 6a는 전류값을 200A로 같게 하고 아크가 덮인 면적을 변화시켰을 때의 용융부의 형상을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 아크가 덮인 면적이 작을 수록 용융부의 길이 방향이 길고, 반지름 폭도 좁다. 이는 아크가 덮여있지 않은 부분에 높은 전류밀도에 의한 핀치 효과가 집중적으로 작용한 결과로 추정된다. Fig. 6b는 임계전류 값에서의 형상들을 나타내고 있다. 임계 전류값은 아크가 덮인 면적이 40, 70, 100%일 때 각각 212, 259, 329A 이다. 그림에서와 같이 아크가 덮인 면적이 클수록 임계 전류값은 증가하고 스프레이 모드에서 금속이행이 이루어짐을 알 수 있다.

에너지 모델의 결과를 기존의 force balance와 pinch instability 모델의 결과 및 실험값[12]과 비교하기 위하여 용융부의 체적을 같은 부피의 구로 환산하여, 구의 지름과 임계 전류치와의 관계를 구하였다(Fig. 7). 에너지 모델의 결과는 기존의 모델의 결과와 마찬가지로 전류가 증가하면 지름이

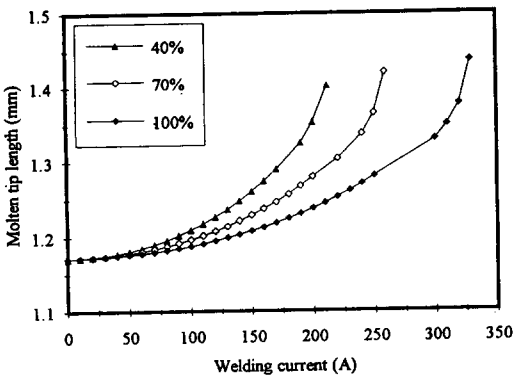
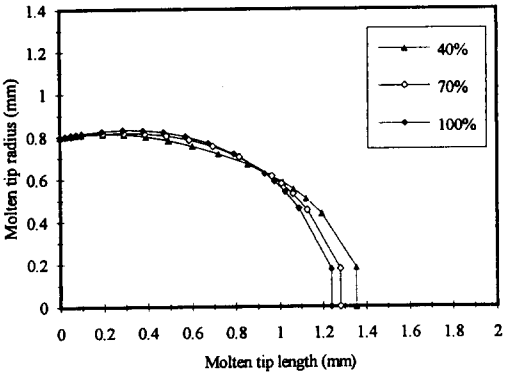
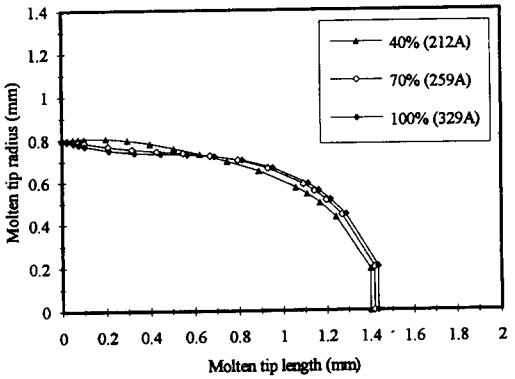


Fig. 5 Effect of arc covered area



(a) fixed current at 200A



(b) critical current

Fig 6 Comparison of molten tip shape for various arc coverd area

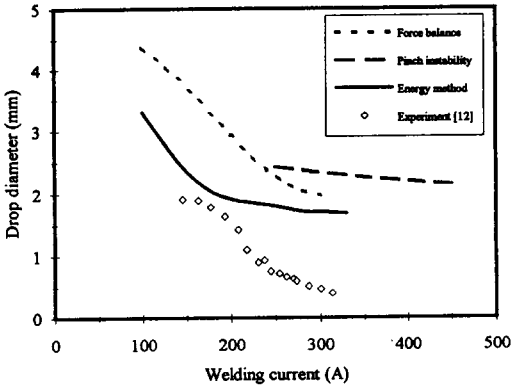


Fig. 7 Comparison with other models and experimental data

작아지는 경향을 보인다. 그러나, 같은 전류값에서 에너지 모델에 의한 부피는 기존의 모델을 이용하여 구한 부피보다 작으며, 실험치에 더 일치한다.

구로 환산된 지름은 300A 이상의 용접전류에서 용접봉의 지름인 1.6 mm 이상의 값을 갖게 되나, 이는 환산된 값으로 실제 형상은 Fig. 4에 나타난 바와 같이 용융부의 지름이 1.6 mm보다 작은 스프레이 모드를 나타낸다. 에너지 모델에서 용융부의 초기 부피가 작은 경우에도 대략 330A 이상의 전류값에서는 발산한다. 임계 전류값 이상에서의 해석을 위해서는 동적효과를 고려한 모델에 대한 연구가 필요한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구의 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1. 에너지 최소화 방법을 사용하여 입상용적 모드와 스프레이 모드의 용융부의 형상 및 용접조건의 영향을 예측할 수 있었다.

2. 용접봉이 연강인 경우, 초기 용융부피가 작고 아크가 덮인 면적이 클 때 전류를 300A 이상 증가시킬 수 있었고, 이때 용융부의 형상이 입상용적 모드에서 스프레이 모드로 변화하였다.

3. 기존의 모델들과 비교하여 유사한 경향을 보였으며, 실험치에 더 근접함을 보였다.

참 고 문 헌

1. J. F. Lancaster : The physics of welding, Pergamon Press, (1985)
2. J. C. Amson : An analysis of the gas shielded consumable metal arc welding system, Brit. Welding J., Vol.9, (1962), pp. 232－249
3. W. J. Greene : An analysis of transfer in gas-shielded welding arcs, Trans Amer. Inst. Elec. Engr., Vol. 79, (1960), pp. 194－203
4. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability, J. Applied Physics, Vol. 18, (1985), pp.1447－1468
5. S. H. Rhee and Jr. E. Kannatey-Asibu : Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding, J. Appl. Phys., Vol.70, (1991), pp. 5068－5075
6. 주동민 : Energy method를 이용한 GMA 공정의 molten tip 형상 해석, 석사학위논문, 한국과학기술원, (1994)
7. W. H. Press, B. P. Flannery, S. A. Teukolsky and W. T. Vetterling : Numerical recipes in C, Cambridge Univ. Press, (1988)
8. J. C. Amson : Lorentz force in the molten tip of an arc electrode, Brit. J. Appl. Phys., Vol. 16, (1965), pp. 1169－1179
9. J. C. Needham, C. J. Cookey and D. R. Milner : Metal transfer in inert gas shielded arc welding, British Welding Jornal, Vol.7, No.2, (1960), pp. 101－114
10. F. M. White : Viscous Flow, McGraw-Hill, New York, (1974), pp. 110－240
11. J. Szekley : Fluid Flow Phenomena in Metals Processing, Academic Press, New York, (1979), pp. 256－257
12. Y. S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D Thesis, M.I.T., (1989)