

Maxwell Stress 를 이용한 GMA 용접공정의 Molten Tip 형상 해석 Analysis of Molten Tip Shape by Maxwell Stress in GMA Welding Process

이강희*, 최상균*, 주동민**, 유중돈*

* 한국과학기술원 자동화 및 설계공학과, 서울

** 대우중공업 중앙연구소 소재기술부, 인천

1. 서 론

GMA (Gas Metal Arc) 용접 공정에서 금속이행 (Metal Transfer) 현상은 용접부의 질과 생산성에 영향을 미친다.[1] 용융부의 형상이나 용융 방울의 이탈 과정을 규명하기 위하여 지금까지 제안된 대부분의 모델들은 Static Force Balance [2,3] 및 Pinch Instability [4] 이론에 기초를 두고 있다. Static Force Balance 모델에선 용융부의 형상을 구로 가정하고, 용융부에 작용하는 힘간의 평형 조건을 고려하여 용융방울의 이탈을 설명하며, Pinch Instability 에 의한 모델은 용융부를 실린더로 가정한 뒤, 미소한 Perturbation 을 주고 임계조건을 해석하는 것이다. 위에서 설명한 모델들은 일반적으로 고정된 형상을 미리 가정하였으므로 다양한 금속이행 모드에 적용하기 어렵다.

본 연구에서는 에너지 Method에 의거하여 용융부의 전체 에너지를 최소화 시키는 형상을 구하였다.[5] 용융부 내의 전체 에너지는 표면장력, 중력, 전자기력 등 세 가지 힘을 고려하였으며, Drag Force 의 영향은 고려하지 않았다. 한편, 용접전류, 아크가 덮인 면적, 용융부의 부피 등 다양한 조건들을 변화시키며 형상에 미치는 영향을 살펴보았다. 이 모델은 고정된 형상에 대한 가정이 없으므로 Globular Mode 와 Spray Mode 의 현실적인 표현에 유용하다.

2. 본 론

2.1 형상 모델링

용융부의 초기 형상은 Fig. 1(a) 에서와 같이 n개의 Circular Slab 들로 구성되어 진다. 용융부에 힘이 작용한 후에는 Fig. 1(b) 와 같이 각 요소들은 부피 보존 조건을 만족시키면서 테이퍼 형상을 이룬다고 가정한다. 용융 시작면의 중심점을 원점으로 하여 아랫방향을 z축, 옆 방향을 r축으로 설정하였을 때, 변형 전후 형상간의 i번째 요소에서의 각 방향의 변위식은 다음과 같다.

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

$$u_z^{(i)} = C_0^{(i)} + \left(\frac{L_i - L_0}{L_i} \right) z \quad \left(C_0^{(i)} = \sum_{k=1}^{i-1} L_k - L_0(i-1) \right) \quad (2)$$

2.2 시스템 에너지의 최소화

용융부에 작용하는 힘들 중 표면장력을 유지력, 중력과 전자기력을 이탈력으로 볼 때 방향을 고려하면 전체 에너지식은 다음과 같다.

$$E_{total} = -E_{st} + E_g + E_{em} \quad (3)$$

시스템의 전체 에너지를 최소화시키는 조건은 위 식을 변형 후의 요소 반지름 a_i 로 편미분한 n 개의 식이 모두 0일 때이다. 본 연구에서는 이 n 개의 연립 방정식의 근들 a_1, a_2, \dots, a_n 을 수치적으로 구하기 위하여 Newton-Raphson 방법을 사용하였다.

2.3 에너지식

표면 장력 에너지식 E_{st} 는 표면장력 계수 σ 를 용융부 전체 표면에 대해 적분한 다음의 식으로 나타내어진다.

$$E_{st} = \int_A \sigma dA \quad (4)$$

중력 에너지식 E_g 는 다음과 같다.

$$E_g = \int \rho \bar{g} \cdot \bar{u} dV \quad (5)$$

전자기력 에너지를 구하기 위해서는 변형 후 요소의 테이퍼 형태를 만족시킬 수 있도록 Maxwell Stress 를 이용하였다. 전도체에서 Maxwell Stress Tensor τ 를 표면에 대해 적분한 로렌츠 힘에 의한 전자기력 에너지 E_{em} 은 다음과 같다. [1, 5-6]

$$E_{em} = \iint \tau \bar{n} \cdot \bar{u} dS \quad \left(\tau = -\frac{B^2}{2\mu_0}, \quad B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r} \right) \quad (6)$$

3. 결과

형상해석은 용융부를 10개 요소로 나눈 후 형태 변화가 심한 처음과 마지막 요소를 다시 4개로 나누어 수행하였다. 용접봉의 재질은 연강으로 Table 1.과 같다.

용융부에 작용하는 각각의 힘을 변화시키면서 해를 구한 결과는 Fig. 2 와 같다. 아크가 용융부 전체 표면에 덮여 있는 경우, Fig. 3 은 각각의 초기길이에서 용접전류를 증가시켜 나갈 때 해의 발산이 일어나기 직전의 형상을 나타낸다. 초기길이가 클수록 용융부의 형상은 구에 가깝게 나타났다. 전류를 증가시킬수록 용융부의 길이는 길어지고 반지름이 작아지는 경향을 나타내었다. Fig. 4 는 초기길이를 변화시키면서 해가 발산하기 직전의 임계전류값을 실험치[3] 및 이론치[4] 들과 비교하여 나타낸 결과이다. 임계전류값은 용융부의부피가 커질수록 작아짐을 알 수 있다. 초기 길이가 1mm 인 경우 아크가 덮인 면적의 영향은 Fig. 5 에 나타내었다. 아크가 덮인 면적이 작을수록 임계전류값이 작으며, 같은 전류값에서 형상변화가 더 일찍 일어남을 알 수 있다.

4. 참고문헌

1. Lancaster J.F. : The physics of welding, Pergamon Press., 1985.
2. Amson J.C. : "Lorentz force in the molten tip of an arc electrode", Brit. J. Appl. Phys., Vol.16, 1965, pp.1169-1179.
3. Kim Y.S. : "Metal transfer in gas metal arc welding", Ph.D Thesis, M.I.T, 1989.
4. Rhee S.H. and Kannatey-Asibu Jr. E. : "Analysis of arc pressure effect on metal transfer in gas-metal arc welding", J. Appl. Phys., Vol.70, 1991, pp.5068-5075.
5. 주동민 : "Energy method를 이용한 GMA 공정의 molten tip 형상 해석", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1994.

Symbol	Parameter	Value
a	initial radius	0.8 (mm)
g	gravity acceleration	9.8 (m/sec ²)
μ_0	permeability	$4\pi \times 10^{-7}$ (N/A ²)
ρ	electrode density	7800 (kg/m ³)
σ	surface tension coeffi.	1.2 (N/m)

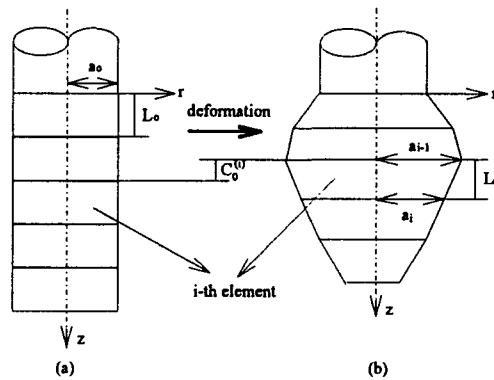


Table 1. Parameter values using in calculation

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

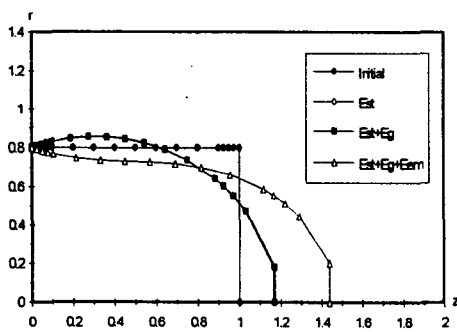


Fig. 2 Molten tip geometry (initial length : 1mm)

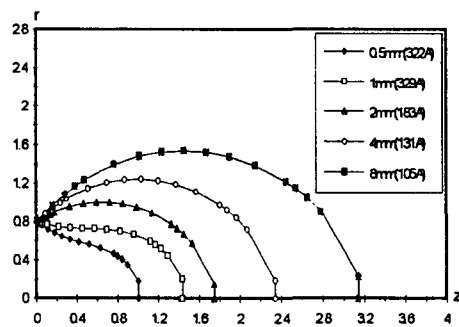


Fig. 3 Shape of molten tip with total energy

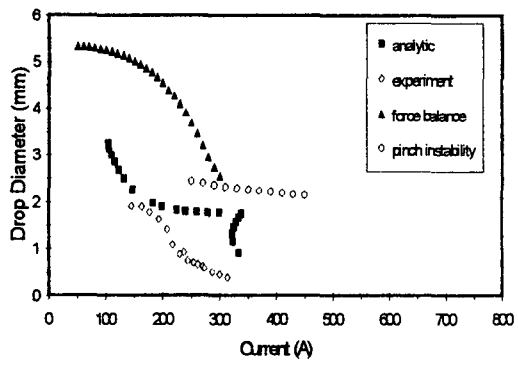


Fig. 4 Length variation with current

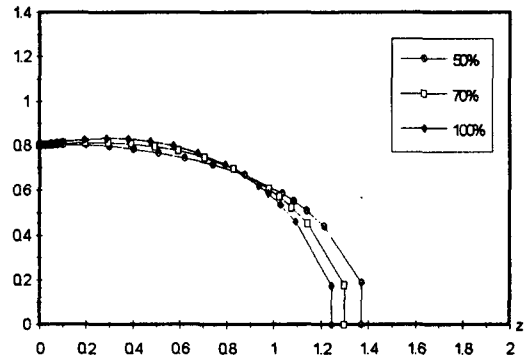


Fig. 5 Variation of arc covered area (220A)