

자기장에 의한 아크 요동의 수학적 모델링과 용접선 추적에의 응용에 관한 연구

A study on the mathematical modeling of magnetic arc oscillation and its application to seam tracking

강윤희, 나석주

한국과학기술원 기계공학과, 대전

1. 서론

자기장에 의한 아크 편향(deflection)은 용접 아크에 자기장을 인가하여 아크 플라즈마내의 전자와 이온이 로렌츠(Lorentz) 힘을 받게 하여 자기장의 방향과 수직인 방향으로 아크를 편향시키는 방법이다. 용접 아크에 자기장을 일정한 크기로 인가하면 아크는 일정한 크기로 편향하게 되고, 자기장을 순차적으로 N-S극을 바꾸어 교류형태로 인가하면 아크는 중심에서 좌우로 요동(oscillation)을 하게 된다.^[1] 자기장에 의한 아크 편향 정도는 자기장의 크기뿐만 아니라, 용접전류, 전압, 아크길이, 보호가스의 종류 등과 같은 용접조건에 따라 다르게 나타난다.^{[2],[3]} 따라서 이러한 원리를 용접품질 제어, 용접선 추적 등과 같은 자동화에 적용하기 위해서는 위와 같은 여러 조건에 따른 아크 편향 정도를 정량적으로 알아야 한다. 본 연구에서는 아크 편향 정도를 아크 플라즈마내의 입자간 충돌을 고려한 운동방정식으로 모델링하였고 실험을 통하여 모델을 검증하였다. 또한 자기장에 의한 요동을 GTA 용접에서 용접선 추적을 위한 아크센서로 이용하기 위해 용접전원 및 전자석을 고려하여 아크센서를 모델링하였다. 모의 실험을 통하여 센서로서의 적용가능성, 기본적인 동특성 및 센서의 감도(sensitivity)등을 정량적으로 고찰하였다.

2. 자기장에 의한 아크 편향의 모델

일반적으로 아크 플라즈마는 무수히 많은 전자, 이온 및 원자 등으로 구성되어 있으므로, 아크 플라즈마의 거동에 대한 해석을 하려면, 각각의 입자들에 대한 운동 방정식을 풀어야 한다. 하지만, Ar과 같은 이온화 정도가 매우 큰 보호가스를 이용하는 용접

아크의 거동 해석에는 이온의 운동 및 전자의 운동을 각각 해석하는 것보다 아크 플라즈마를 전자와 이온이 균일하게 혼합된 하나의 유체로 간주하면 비교적 간단히 아크 플라즈마의 거동을 해석할 수 있다.

용접 아크는 근사적으로 전자의 개수와 이온의 개수가 같기 때문에 전기적으로 중성으로 볼 수 있다. 즉, $n_e \approx n_i$ 이다. 따라서, 전자의 질량 및 이온의 질량을 각각 m, M 으로 표시하면, 아크 플라즈마의 질량 밀도(mass density), 전하밀도(charge density), 질량속도(mass velocity), 전류밀도(current density)등은 식 (1), (2), (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho = n_i M + n_e m \approx n(M + m) \approx nM \quad (1)$$

$$\sigma = (n_i - n_e)q \quad (2)$$

$$\vec{u} = \frac{n_i M \vec{u}_i + n_e m \vec{u}_e}{\rho} \approx \frac{M \vec{u}_i + m \vec{u}_e}{M + m} \approx \vec{u}_i + \frac{m}{M} \vec{u}_e \quad (3)$$

$$\vec{j} = q(n_i \vec{u}_i - n_e \vec{u}_e) \approx ne(\vec{u}_i - \vec{u}_e) \quad (4)$$

이온화 정도가 매우 큰 아크 플라즈마에서는 전자와 이온간의 충돌(coulomb collisions)이 전자-원자, 이온-원자간의 충돌보다 훨씬 많이 발생하므로 전자-이온간의 충돌 현상만 고려하면, 이온 및 전자의 운동방정식은 각각 식(5), (6)과 같다.^[4]

$$Mn_i \frac{d\vec{u}_i}{dt} = qn_i (\vec{E} + \vec{u}_i \times \vec{B}) - \nabla p_i + \vec{R}_{ie} \quad (5)$$

$$mn_e \frac{d\vec{u}_e}{dt} = -qn_e (\vec{E} + \vec{u}_e \times \vec{B}) - \nabla p_e + \vec{R}_{ei} \quad (6)$$

여기서, \bar{R}_{ie} , \bar{R}_{ei} 는 이온과 전자 두 부류간의 충돌에 의한 운동량 전달을 나타낸다. Fig.1과 같이 자기장은 z방향, 전기장 및 압력구배는 y방향으로만 존재한다고 보고 자기장에 의한 아크 편향은 아크 플라즈마가 항상 평형상태에 있을 만큼 정적(static)이라고 가정하면, 식(1), (2), (3), (4)를 이용하여 식(5), (6)으로부터 다음과 같은 아크 플라즈마의 평균속도의 직교성분을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} u_x &= \frac{E_y}{B_z} - \frac{1}{2neB_z} \frac{dp}{dy} \\ u_y &= -\frac{\eta}{B_z^2} \frac{dp}{dy} \end{aligned} \quad (7)$$

모델의 검증을 위해서 아크 편향 실험을 수행하였다. Fig.2는 아크 편향 정도를 알아보기 위한 실험장치를 나타낸 것으로 평판위에서 아크를 편향시켜 용접실험을 수행하였다. 아크 편향 정도는 고속카메라를 이용하여 측정하였으며, 그 크기는 아크 중심의 편향으로 정의하였다. 실험에 사용된 조건은 Table 1과 같다.

Fig.3은 자속밀도 및 용접전류에 따른 아크 편향의 크기를 나타낸 것으로, 자속밀도의 크기가 증가할수록 아크 편향이 커지고, 용접전류가 증가할수록 편향의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 여기서 전류가 감소하는 것은 아크의 강성(arc stiffness)이 작아진다는 것을 의미한다.

3. 아크 편향에 따른 용접전압의 변화

Fig.4는 비소모성 전극을 이용하는 GTA 용접기, 용접 케이블 및 아크 저항등을 포함한 등가 전기회로를 나타낸 것으로, 식(8)과 같이 나타낼 수 있다.^[5]

$$\frac{dI}{dt} = \frac{U_s - u_{ao}}{L_s + L_c} - \frac{K_s + R_c + R_a}{L_s + L_c} I - \frac{E_{ai} + E_{ci}I}{L_s + L_c} L_a \quad (8)$$

전자석 코일에 인가되는 전압의 주파수가 증가함에

따라, 코일의 인덕턴스 저항값이 증가하여 코일에 흐르는 전류의 크기가 감소하게 된다. 따라서, 인가 전압의 주파수가 증가함에 따라 자속밀도의 크기는 감소한다. Fig.5는 N-S극 스위칭 주파수에 따른 자속밀도의 변화를 나타낸 것이다.

Fig.6은 아크 요동에 의한 용접전압 신호의 변화 및 모의실험 결과를 나타낸것으로서, 약 1Hz의 요동 주파수를 사용하였다. 용접전압 신호는 아크 요동 주파수외의 고주파 노이즈를 포함하고 있어 디지털 저주파 통과 필터를 사용하여 신호의 변화량을 계산하였다. 아크 요동에 따라 용접전압의 증감이 약 2V정도 나타났다. Fig.7은 아크 요동 주파수에 따른 용접전압 변화량을 나타낸 것이다. 아크 요동 주파수가 증가할수록 전자석의 인덕턴스로 인하여 자속밀도의 크기가 감소하여 약 15Hz이상부터는 용접전압의 변화량이 점차 감소하는 것을 알 수 있다.

4. 결론

자기장에 의한 아크 편향의 모델링 및 검증실험과 아크 요동에 따른 용접전압 변화 실험 및 모의실험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 아크 편향 모델을 이용한 아크 편향 계산결과와 검증 실험결과는 매우 유사하였다.
- (2) 아크 요동에 따라 아크 길이가 변화하였고 이에 따라 용접전압 신호의 변화가 명확히 나타났다.
- (3) 전자석의 인덕턴스로 인하여 코일에 인가되는 전류의 주파수가 약 15Hz이상부터는 자속밀도의 크기가 점차 감소하였다. 자속밀도의 감소는 아크 편향 크기의 감소 및 용접전압 변화량의 감소를 의미하므로 이에 대한 보정이 필요하다것을 알 수 있었다.

참고문헌

- [1] D.B. Serdyuk and A.N.Kornienko, "The welding arc in an alternating transverse magnetic field", Automatic Welding, No.10, 1963, pp.7-13

[2] G. K. Hicken and C. E. Jackson, "The Effect of Applied Magnetic Fields on Welding Arcs", Welding Journal, Research Supplement, November, 1966, pp. 515/s-524/s

[3] G.M. Ecer, "Magnetic Deflection of the Pulsed Current Welding Arc", Welding Journal, June, 1980, pp.183/s-191/s

[4] Robert J. Goldston and Paul H. Rutherford, "Introduction to Plasma Physics", Institute of Physics Publishing, Bristol and Philadelphia, 1995

[5] M. Ushio and W. Mao, "Modelling of an Arc Sensor for DC MIG/MAG Welding in Open Arc Mode: Study

of Improvement of Sensitivity and Reliability of Arc Sensors in GMA Welding(1st Report)", Q. J. Jpn. Weld Soc., Vol.14, No.1, 1996, pp.99-107

Table 1 Experimental conditions

Welding current	100A – 300A
Arc length	5-10mm
Magnetic flux density	0-50gauss
Shielding gas	Pure Ar
Electrode	φ2.4, 60deg. thoriated tungsten

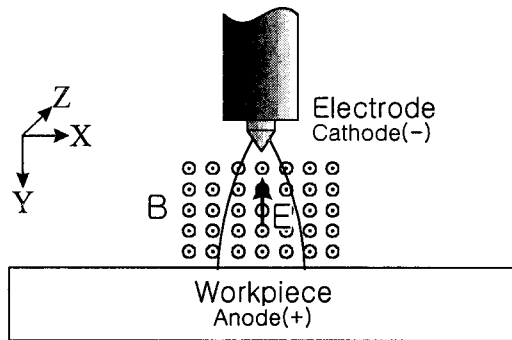


Fig.1 Electric field and magnetic field

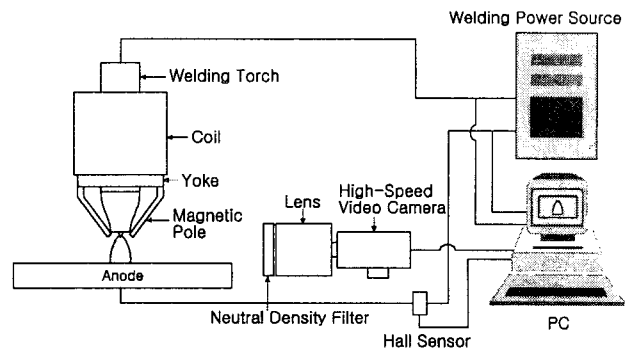


Fig.2 Experimental setup

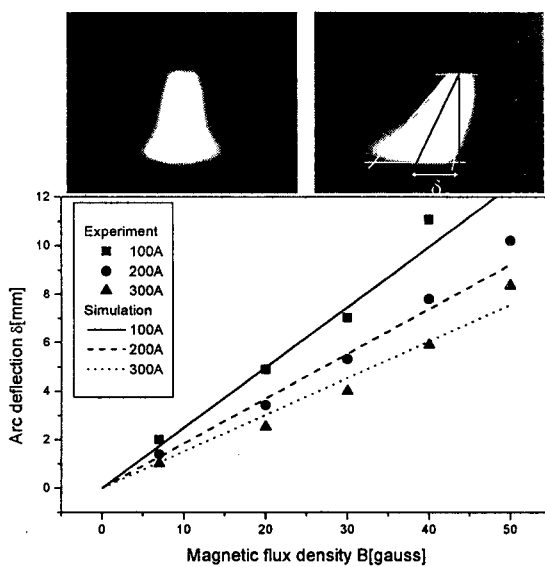


Fig. 3 Arc deflection according to magnetic flux density and welding current

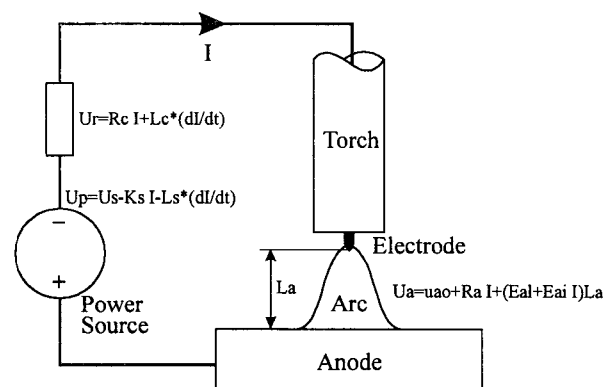


Fig. 4 Equivalent circuit of GTAW system

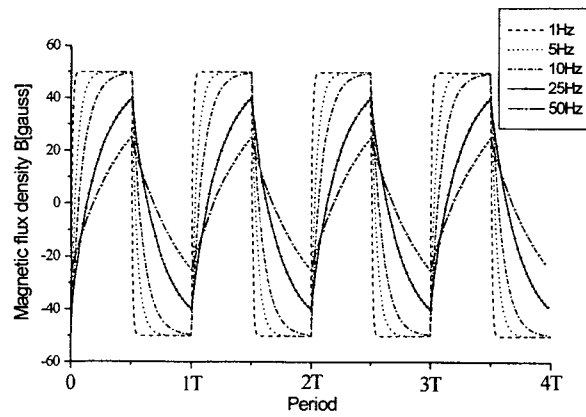


Fig. 5 Waveform of varying magnetic field

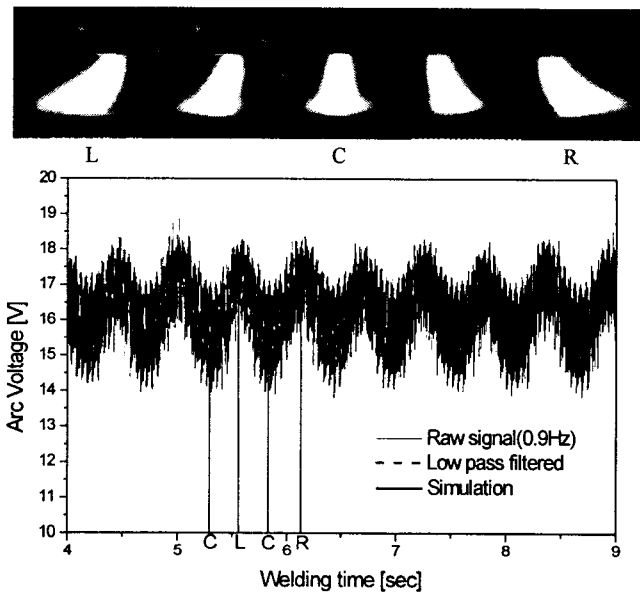


Fig. 6 Welding voltage waveform of experiment and simulation during bead-on-plate welding with magnetic arc oscillation

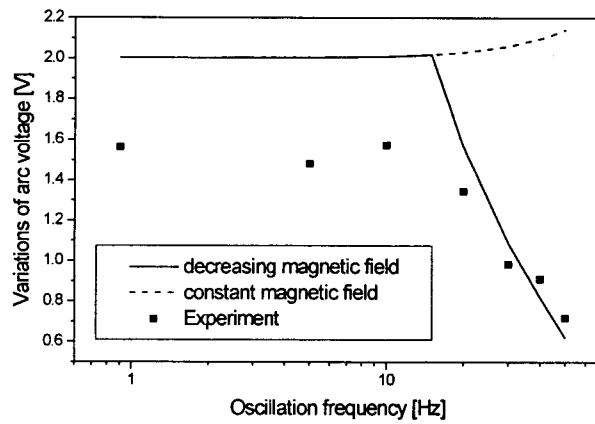


Fig. 7 Frequency characteristics of welding voltage