

단순 모델을 이용한 GMA 용접 시스템의 동적 거동 해석

Analysis of dynamic behavior of GMAW system using simple model

한국과학기술원, 기계공학과
이재영(*), 이지혜, 유중돈

1. 서론

Gas metal arc (GMA) 용접은 용접변수로 용접전류와 전압, 용접속도, 와이어 송급속도, contact-tip에서 모재까지의 거리 (contact-tip to workpiece distance: CTWD), 분위기 가스, 와이어 종류 등을 들 수 있으며, 양호한 용접품질을 얻으려면 적절한 범위의 용접변수 값을 선정하여야 한다. 본 연구는 개략적인 용접조건을 결정하기 위한 기초연구로서 송급속도, CTWD, 용접기 개방전압 등을 입력으로 하여 용접시스템의 동적거동에 대하여 해석하였다.

용접 시스템 전체를 해석하려면 용접기, 와이어 용융 및 아크의 특성식을 풀어야 하며, 용접 조건에 따른 금속이행 모드의 변화를 고려하여야 한다. 국내에서 널리 사용되는 단락이행을 해석하려면 힘평형 모델이나 pinch instability 이론과 같은 단순 모델이 필요하며, 임상용적 모드를 해석하려면 기존에 사용하는 특성식을 보완하여야 한다.

본 연구에서는 용접시스템의 동적거동을 해석하기 위하여 수정한 용융 특성식과 단락이행 모드의 단락시간을 예측하기 위한 단순 모델을 제안하였다. 계산 결과는 실험 결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 용접 시스템의 모델링

2.1 용접 시스템의 특성식

용접시스템은 Fig.1에 나타난 바와 같이 용접기와 와이어 송급장치로 구성되어 있으며, 이를 해석하기 위하여 용접기와 와이어 용융 및 아크의 특성식을 사용한다. 용접기의 특성을 저항과 인덕턴스로 구성된 RL 회로로 표현하면 다음과 같다.

$$L_p \frac{dI}{dt} + RI = U_o - U_a \quad (1)$$

아크의 특성식으로 용접전류와 아크전압 및 아크 길이의 관계를 표현한 Ayrton의 식을 사용하였다.

$$U_a = k_1 + k_2 I + (k_3 + k_4 I) \ell_a \quad (2)$$

단락이 발생하면 아크가 소멸하므로 아크전압은 0으로 놓고 계산하였다.

저전류 영역에서 발생하는 입상용적 모드에서는 스프레이 모드와 비교해서 상당히 큰 용적이 낮은 주파수로 이탈하므로 돌출길이를 고체상태의 와이어와 용적 길이의 합으로 표현하였다. 용적이 이탈하기 전까지 고액 경계면과 용적 크기의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d\ell_{es}}{dt} = v_{wf} - (aI + b\ell_e I^2), \quad \ell_e = \ell_s + \ell_d \quad (3)$$

$$\frac{dV_o}{dt} = (aI + b\ell_e I^2) \left(\frac{\pi d_e^2}{4} \right) \quad (4)$$

용적의 이탈 여부는 입상용적과 스프레이 모드에 대하여 각각 힘평형 모델과 pinch instability 이론을 적용하여 판별하며, 용적이 이탈하면 용적의 부피가 모두 이탈한다고 가정하였다 ($\ell_d = 0$). 이와 같이 수정된 특성식은 입상용적 뿐만 아니라 단락이행 모드의 해석에 유용하다.

2.2 단락이행의 단순 모델링

단락이행 모드에서의 동적 거동을 해석하려면 입상용적과 스프레이 모드에서 사용되는 힘평형 모델과 pinch instability 이론과 유사한 단순 모델이 필요하다. 수치해석 결과로부터 단락이행에서 단락부의 유동과 파단에 영향을 미치는 인자는 표면장력과 전자기력으로 알려져 있으므로, 이를 고려하여 단락 내부의 압력과 유속을 계산함으로써 단락시간을 예측하였다.

단락이행 모드를 단순 모델링하기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다: (1) 단락부의 초기 형상은 구형이고 용융풀과의 초기 접촉 반경은 용접봉의 반경과 동일하다. (2) 단락 내부의 유속과 용융풀 내부의 압력은 무시한다. (3) 가정하에서 단락부의 형상은 Fig.2에 나타난 바와 같이 두 단계로 변화하며, 각 단계에서 유속은 일정하다.

단락이행의 단계는 Fig.2에 나타난 바와 같이 두 단계로 가정하여, (1) 용융풀에 접촉한 구형의 용적이 실린더 형상으로, (2) 실린더 단락부가 완전히 이행되는 과정을 나타낸다. 단락부 중심에서의 압력은 표면장력과 전자기력에 의하여 결정되며, 단락 내부의 압력에 의하여 유속이 발생한다. 유속과 용융풀 내부의 압력을 무시하면, 각 단계에서 Bernoulli 법칙을 이용하여 단락 중심의 압력과 접촉면에서의 유속과 이때 소요되는 단락시간은 다음과 같이 유도된다.

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{\mu_o J^2 a^2}{4} + \frac{2\gamma}{a} & P_2 &= \frac{\mu_o J^2 R^2}{4} + \frac{\gamma}{R} \\ v_1 &= \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_1 + g(a-h))} & v_2 &= \sqrt{\frac{2}{\rho}(P_2 + g(a-h))} \\ \Delta t_1 &= \Delta V_1 / v_1 & \Rightarrow & \Delta t_{sc} = \Delta t_1 + \Delta t_2 \end{aligned} \quad (5)$$

3. 결과 및 고찰

용접 시스템의 동적 특성을 나타내는 미분 방정식은 Runge-Kutta 방법으로 계산하며, 금속이행 모드에 따라 용적의 이탈조건이나 단락시간을 계산하였다. 금속이행 모드와 분위기 가스에 따른 아크와 용융 특성을 나타내는 상수는 아르곤 가스와 직경 1.2mm인 강 용접봉을 사용하는 경우에 해당되는 상수를 사용한다. 시간에 따른 용접전류와 전압, 돌출길이의 변화와 단락이행 시 단락시간을 계산하였다.

용접조건으로 CTWD를 19mm, 와이어 송급속도를 100mm/s, 용접기의 개방전압을 19V로 주어졌을 때, 시간에 따른 용접전류와 전압, 돌출길이의 변화를 계산하여 Fig.3에 나타내었다. 평균 전류와 전압은 각각 219A와 17.3V로 계산되었으며, 단락이행과 임상용적 모드가 함께 발생하는 것을 보여준다. Fig.3의 결과로부터 용접조건에 따른 특정 금속이행 모드 뿐만 아니라 천이 영역을 단순 모델을 사용하여 예측할 수 있음을 알 수 있다.

천이 영역의 계산결과를 가용한 실험 데이터[3]와 비교한 결과를 Fig.4에 나타내었으며, 실험에서 측정된 금속이행 모드는 단락이행과 스프레이 모드이다. 계산결과와 실험결과는 대략 20% 정도의 오차를 보이지만 상당히 정확하게 실험결과와 금속이행 모드를 예측하였으며, 용접전압의 변화 추세는 일치하였다.

단락이행 모드의 경우에 저전류 영역에서는 실험결과와 비교적 일치하지만, 고전류 영역에서는 상당한 차이가 발생한다. 이는 본 연구에서 제안한 모델이 단락이행 현상을 단순히 2단계로 가정하였으므로 급격히 증가하는 용접전류에 의한 전자기력의 영향을 제대로 고려하지 못하기 때문인 것으로 추정된다. 전반적으로 임상용적과 단락이행 모드에서 용접시스템의 동적 거동을 정확하게 예측하려면 용접조건에 따른 정확한 상수값을 이용하여 계산하는 것이 필요하다.

참고문헌

1. Ushio, 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)", J. of Japan Welding Society, Vol.14, No.1, pp.99-107, 1996.
2. Lancaster, J.F., Physics of welding arc, Pergamon Press.
3. Heald, P. R., Madigan, R. B., Siewert, T. A. and Liu, S., "Mapping the droplet transfer for an ER100S-1 GMAW electrode", Welding Journal, Vol.73, No.2, pp. 38s - 44s, 1994.

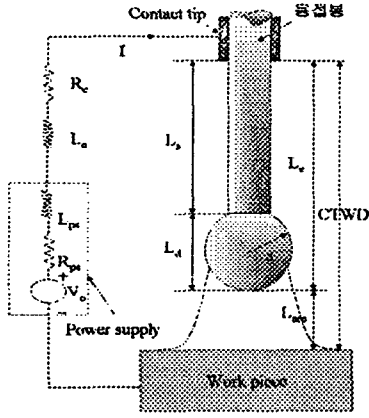


Fig.1 Schematics of GMAW system

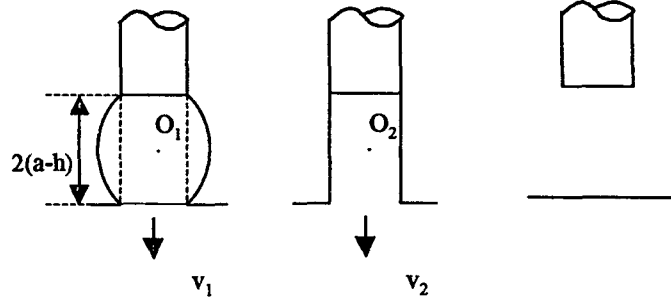


Fig.2 Modeling of short-circuit transfer

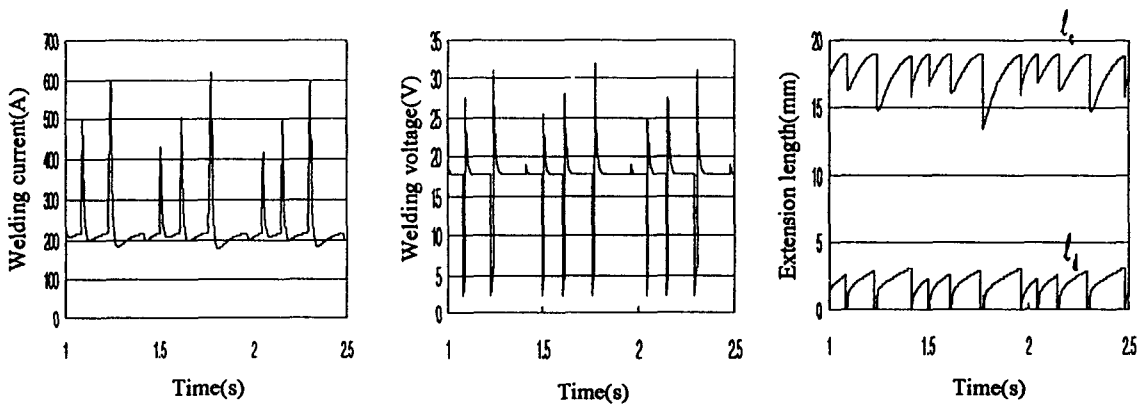


Fig.3 Calculated welding current and voltage

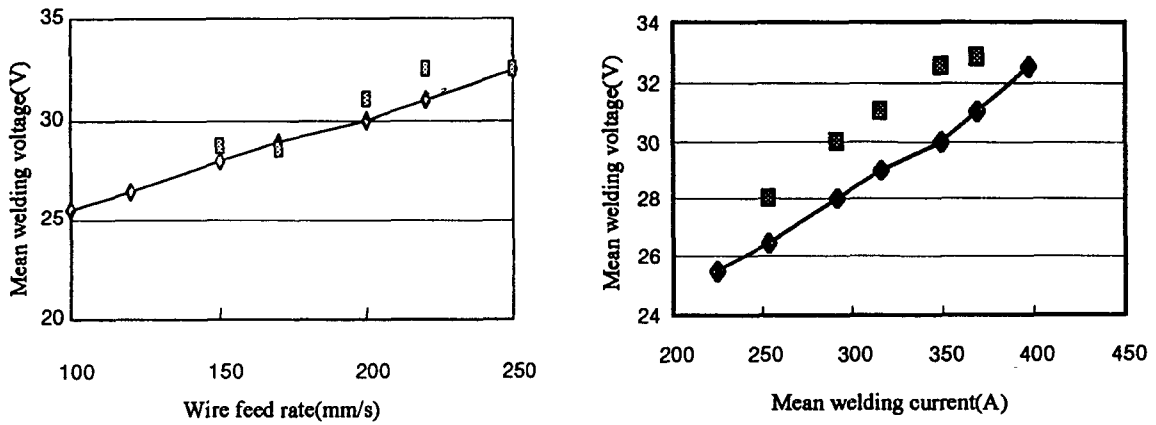


Fig.4 Comparison between calculated and experimental results