

금속이행을 고려한 GMA 용접 시스템의 동특성 해석

박세홍(경북대원), 김면희(경북대원), 강세령(경북대원)
최상균(경북대 기계공학부), 이상룡(경북대 기계공학부)

Dynamic behavior of GMAW considering metal transfer

S.H. Park (Graduate Std., KNU), M.H. Kim(Graduate Std., KNU), S.R. Kang(Graduate Std., KNU)
S.K. Choi(Mech Eng., KNU) and S.R. Lee(Mech Eng., KNU)

ABSTRACT

Welding variables and conditions in gas metal arc welding (GMAW) effect on the weld quality and productivity, extensive research efforts have been made to analyze the welding variables and conditions. In this study dynamic behavior of GMAW system is investigated using the characteristic equations of the power supply, wire and welding arc. Characteristic equation of wire is modified to include the effect of droplets attached at the electrode tip.

The dynamic characteristics of arc length, current, voltage with respect to the step, ramp inputs of CTWD was simulated, seam tracking procedure using arc sensor was simulated with variable V-Groove geometries and weaving frequencies. From results of simulation, some predictions about dynamic characteristics of GMAW and welding process are available. The proposed simulator and results appear to be utilized to determine the proper welding conditions, to be improved by considering power supply dynamic characteristics.

Key Words : GMAW(Gas Metal Arc Welding), Metal Transfer(금속이행), Dynamic Simulation(동적 모사)

1. 서론

GMA (Gas Metal Arc) 용접 공정은 소모성 용접 봉과 모재 사이에 아크를 발생시키고 이 때 동반되는 고열을 이용하여 모재를 접합 시키는 공정이다. 이 때, 용접봉은 연속적으로 용융되어 모재로 이행하게 되는데 이를 금속 이행(metal transfer)이라고 한다. 용접봉의 금속 용융 이행 현상은 용접 전류, 전압, 용접봉 송급 속도, 차폐 가스(shielding gas)와 같은 용접 조건의 변화에 따라, 그리고 표면장력 계수나 밀도 등과 같은 용융 금속의 물성치에 따라 변화한다. 한편, GMA 용접에서는 소모성 전극을 사용하므로 용융부가 모재에 단락시 전류를 크게 증가시켜야 용접을 진행할 수 있으므로 정전압 전원부(constant voltage power supply)를 사용한다. 용융부의 성장과 이탈에 따라 아크의 길이는 주기적으로 변동하며, 용접 전류 및 용융률도 변화하게 되어 금속 이행 현상에 영향을 주게 된다. 또한 용접 전류의 변화는 용접 전원부의 인덕턴스 값에 의해서

크게 영향을 받으므로, 금속 이행을 정확하게 예측하기 위해서는 다양한 용접 조건 및 용접봉의 물성치의 영향을 고려해야 함과 동시에 용접 전원부의 특성에 따른 변화도 고려해야 한다.

금속 이행의 각 형태에 따라 아크 안정성이나 용입 깊이, 스패터의 발생량, 비드 형상 등에 큰 영향을 미치며, 결국 용접 생산품의 품질을 결정하는 중대한 역할을 담당한다. 따라서 GMAW 분야에서 용접봉의 금속 용융 이행의 분석과 제어에 관한 연구는 여러 연구자들에 의하여 활발하게 진행되어 왔다. 최근까지의 연구 동향을 살펴보면 기존의 연구들은 주로 고속 카메라를 이용하여 금속 이행 현상의 관찰과 함께 전류, 전압 등의 용접 변수와 금속 이행의 형태, 액적의 크기나 이행 주기와 같은 변수들의 상관 관계를 조사하는 것이 주류를 이루고 있다. 그러나 용접공정에서 발생하는 강한 아크 빛과 고열, 스패터 등으로 인하여 실험 환경이 제한되므로 해석적 연구를 실험적 연구와 함께 병행하는 것이 바람직하다.

이론적인 연구로 대표적인 것으로는 용융부를 강체로 가정하고 용융부에 작용하는 힘들의 상관관계로부터 액적의 이탈을 설명하는 정적 힘 평형 모델(static force balance model)과 용융부를 실린더로 가정하고 외란에 대한 압력의 변화로 액적의 이탈을 설명하는 pinch instability 이론이 있다. 이 두 가지 모델은 금속 이행 현상을 단순한 식들로 표현할 수 있다는 장점이 있으나, 용융부의 형상은 변하지 않는 것으로 미리 가정하였고, 시간에 따른 변화를 고려하지 못하는 정적인 해석이므로 실제 용접 조건에 적용하기에는 어려움이 있다.

금속 이행 현상은 열적인 상호작용과 용융, 그리고 다양한 힘들이 작용하는 2 상 유동으로서 동적 특성을 해석하기에는 어려움이 있다. 지금까지 전산유체 역학의 기법을 도입하여 금속 이행의 동적 특성을 해석한 연구 결과들이 다수 발표되었으며 특히 자유표면 기술 알고리즘인 VOF(Volume of Fluid) 법을 사용함으로써 용접 조건의 변화에 따라 용융부의 형상 및 내부 유동, 전류 밀도의 분포 등을 예측할 수 있었다. 그러나 기존 연구에서는 용접 전원부의 해석을 포함하고 있지 않으므로 용접 전원부 용융률 등은 일정한 것으로 가정하고 있지만, 정전압 전원부를 가진 실제 GMA 용접 공정에서는 아크 길이의 변화에 따라 용접 전류가 변동하고 따라서 용접봉 돌출길이나 용융률 등이 변화하게 되므로 금속 이행도 이에 따라 변화할 것으로 예상된다.

아크 길이의 변동을 고려한 용접 시스템의 동특성에 대해서도 많은 연구가 수행되었으나, 대부분의 연구는 금속 이행 현상을 고려하지 않고 용융된 금속은 연속적으로 이탈된다고 가정하거나, 단순히 정적 힘 평형 모델이나 pinch instability 이론에 의하여 아크 길이를 계산하고 있으므로 정밀한 예측을 하기 어렵다. 본 연구에서는 이와 같은 점에 착안하여 VOF 법 및 전산유체역학의 기법들을 도입하여 금속 이행 현상을 해석하고, 용접 전원부의 동특성 해석에 응용함으로써 용접 공정중의 모재의 형상 변화나 용접 조건의 변동에 따른 여러 용접 변수의 변화를 살펴 보고자 한다.

2. GMA 용접 시스템의 모델링

2.1 금속이행의 모델링

금속 이행의 동적 해석을 위해서는 자유 표면을 포함한 유동의 해석이 필요하다. 본 연구에서는 자유표면을 기술하는 방법으로서 VOF 법을 사용하였다. VOF 법은 각 셀에서의 유체의 부피 분율을 함수 F 로서 정의하고, 이로부터 자유 표면의 기울기와 곡률을 계산하는 방법이다. 즉, 유체가 존재하지

않는 셀의 F 값은 0 이고 유동장 내부의 F 값은 1 이다. 자유 표면이 존재하는 셀에서의 F 값은 0 과 1 사이의 값을 갖게 된다. 이 방법을 사용하면 F 에 관련된 식을 지배방정식에 추가하여 함께 풀어야 하지만, 주위 셀들의 F 값을 비교하여 자유표면의 위치 및 기울기를 비교적 쉽게 표현할 수 있으며 이로부터 자유표면의 압력을 계산할 수 있다.

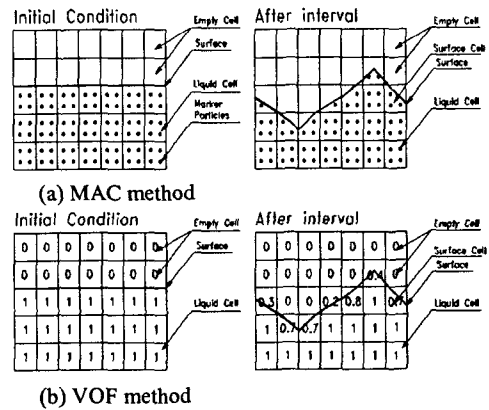


Fig. 1 Express of free surface in MAC and VOF methods

본 연구를 수행함에 있어 도입된 가정은 다음과 같다. 용융 금속은 비압축성 유체이고, 해석하고자 하는 금속 이행현상은 축 대칭의 2 차원이며, 열적으로 평형상태에 있어서 용융 금속의 물성치는 일정하고, 아크의 항력에 의한 영향은 고려하지 않았다. 이러한 가정 하에서 금속 이행 현상은 다음의 연속식과 운동량식에 의해서 표현된다.

$$\frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_r}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] + \frac{f_r}{\rho}$$

$$\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_z}{\partial r} \right] + \frac{f_z}{\rho} \quad (2)$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

윗 식에서 f_r 과 f_z 는 r 과 z 방향의 체적력을 나타낸 것으로 중력과 전자기력의 영향이 포함된다. 전자기력은 라플라스 방정식을 통하여 각 셀의 전압 분포를 구한 뒤, 이로부터 전류 밀도와 자속 밀도를 구하여 벡터 곱을 취함으로써 구할 수 있다.

2.2 용접 전원부 모델링

용접 전원부를 단순화하면 Fig.2 와 같이 저항과 인덕터로 나타낼 수 있다. 이 때 개방 전압 U_0 은

다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

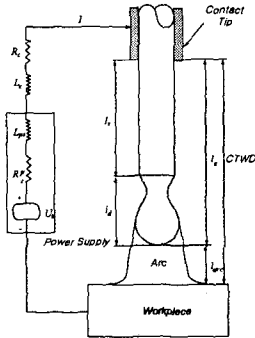


Fig. 2 Modeling of power supply and arc characteristics

$$U_o = (L_p + L_c) \frac{dI}{dt} + (R_p + R_c + R_a)I + U_a \quad (4)$$

여기서 I 는 전류, U 는 전압, R 은 저항, L 은 인덕턴스를 나타내며, 하첨자 p, c, e, a 는 각각 전원부, 케이블, 용접봉 돌출길이 그리고 아크를 나타낸다. 용접 전압 U_w 은 용접기의 출력단자 사이의 전압으로 케이블 및 용접봉 돌출부의 전압강하와 아크 전압의 합으로 나타낼 수 있다.

$$U_w = (R_c + R_e)I + U_a \quad (5)$$

아크 전압은 용접 전류가 일정하면 아크 길이에 비례하며, 전류와 아크 길이의 함수로 표현된다.

$$U_a = U_{a0} + R_a I + E_a l_a \quad (6)$$

$$E_a = E_{a1} + E_{a2} I \quad (7)$$

여기에서 E 는 전기장의 세기를 나타낸다. 용접봉의 용융 속도는 아크 열과 용접봉의 줄열에 의하여 결정되며 다음과 같이 표현된다.

$$v_m = aI + b l_a I^2 \quad (8)$$

위 식에서 상수 a, b 는 용접봉의 재질 및 지름, 금속이행 모드, 보호 가스의 종류 등에 따라 다르며 실험적으로 구할 수 있다. 용접봉의 돌출길이 l_c 는 전극 접촉부에서 고액 경계면까지 고체 상태의 길이를 나타낸다. 용접봉 돌출 길이는 송급 속도와 용융 속도의 차이에 의해 변화하며 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$\frac{dl_c}{dt} = v_w - v_m \quad (9)$$

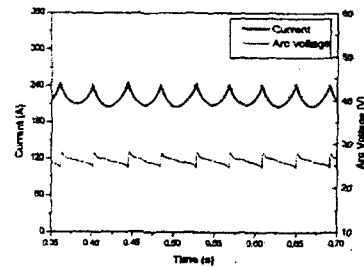
$$CTWD = l_a + l_s + l_d \quad (10)$$

위 식에서 l_d 는 용융부의 길이이다. 주어진 초기 조건에 대하여 Runge-Kutta 법을 이용하여 용접전류를 계산하고 (5)-(10)식으로부터 용융률, 용접봉 돌출 길이, 아크의 길이를 계산한다. 계산된 용접 전류 및 용융률은 전산 유체역학을 통한 유동부 해석에 입력되며 주어진 시간 간격동안 용융부의 형상 변화를 계산한다. 변화된 조건으로부터 새로운 용접 전류를 계산하고 이 후의 과정을 반복함으로써 용접 시스템의 동특성을 해석할 수 있다.

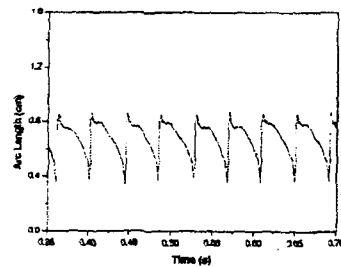
3. GMA 용접 시스템의 동특성

3.1 입상용적모드의 동특성

용접기의 개방전압을 27.3V, CTWD를 25mm로 하고 시뮬레이션을 수행하며 입상용적모드의 동특성을 해석하였다. Fig.3은 정상상태에 이른 후의 용접 전류, 아크 전압, 아크 길이, 전극 접촉부에서 고액 경계면의 길이 등의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다. 용융부가 성장함에 따라 아크의 길이는 짧아지고, 아크 전압은 감소, 용접 전류는 증가하게 된다. 용융 액적의 이탈 이후에 아크의 길이는 급격히 길어지고 아크 전압은 증가, 용접 전류는 크게 감소하며 이와 같은 과정이 반복되게 된다. 한편 이와 같은 동특성은 용접기의 인덕턴스 성분에 의해 크게 변화하게 된다.



(a) Calculated current and arc voltage



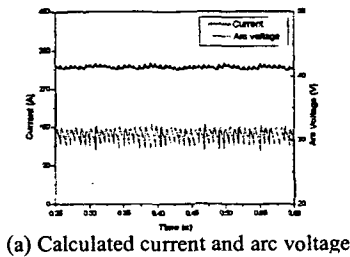
(b) Calculated arc length

Fig. 3 Free response in globular mode

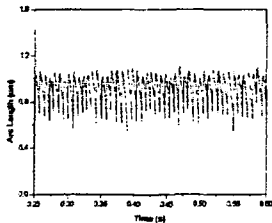
3.2 스프레이 모드의 동특성

용접기의 개방전압을 32.5V, CTWD를 26mm로

하고 시뮬레이션을 수행하며 스프레이모드의 동특성을 해석하였다. Fig.4는 정상상태에 이른 후의 용접 전류, 아크 전압, 아크 길이, 전극 접촉부에서 고액 경계면의 길이 등의 시간에 따른 변화를 나타낸 것이다.



(a) Calculated current and arc voltage



(b) Calculated arc length

Fig. 4 Free response in spray mode

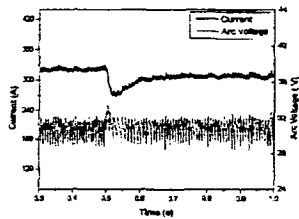
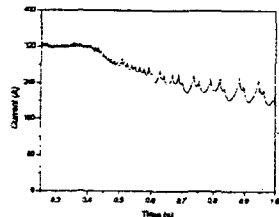
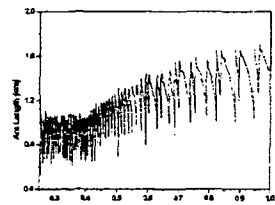


Fig. 5 Response to step input in spray mode



(a) Calculated current



(b) Calculated arc length

Fig. 6 Response to ramp input in spray mode

스프레이 모드 하에서 0.3cm 크기의 step 입력이 가해졌을때와 경사각 60°도의 ramp 입력이 가해졌을때의 응답을 다음의 Fig.5 와 Fig.6 에 보인다.

4. 결론

이상에서 살펴본 바와 같이 전산유체역학을 기법을 이용하여 금속이행을 해석하고, 용접전원의 인덕턴스 등을 고려한 아크의 동특성을 시뮬레이션을 통하여 관찰해 볼 수 있었다. 그리고, step 입력 및 ramp 입력 등에 대한 전압, 전류, 아크길이 등의 관계를 해석함으로써, 용접선 추적등의 연구에 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Waszink, J. H., "Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW", *Welding Journal*, Vol.65, No.11, pp.289s~290s, 1986.
2. Ueguri, S., Hara, K. and Komura "Study of metal transfer in pulsed GMA welding", *Welding Journal*, Vol.64, pp.242s~250s, 1985.
3. Lancaster, J. F., "The physics of welding", 2nd Ed., Pergamon Press, 1986.
4. 최상균, "GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1998.
5. Haidar, J. and Lowke, J. J., "Predictions of metal droplet formation in arc welding", *J. Phys. D:Appl. Phys.*, Vol.29, pp. 2951~2960, 1996.
6. Maruo, H., Hirata, Y. and Yoshida K., "Numerical Analysis on the Stability of conductive fluid cylinder (The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer, Rept. 1)", *Quarterly Journal of Japanese Welding Society*, Vol.7, NO.4, pp.473~478, 1989.
7. Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of fluid(VOF) method for the dynamics of free boundaries", *Journal of Computational Physics*, Vol.39, pp.201~225, 1981.
8. 이재영, "단순 모델을 이용한 GMA 용접 시스템의 동적거동 해석", 석사학위논문, 한국과학기술원, 1999.
9. 한경기, "GMA 용접에서 아크 길이와 용접 전류의 동특성에 관한 연구", 석사학위논문, 경북대학교, 2000.