

# 자유 표면을 고려한 GMA 용접의 단락 이행에 관한 동적 해석

## Dynamic analysis of short-circuit transfer in GMAW

고 성 훈, 최 상 균, 유 중 든

한국과학기술원, 기계공학과

### 1. 연구 배경 및 목적

GMA 용접에서 금속 이행 현상은 Spray, Globular, Short-circuit 모드 등으로 분류된다. 그 중 단락 이행 모드는 저전류 영역에서 발생하며, 액적이 용접봉에서 이탈하지 않고 모재의 용융풀과 접촉하여 교락부(molten bridge)가 형성되고 금속 이행이 일어난다. 그 후, 파단과 동시에 아크가 재생되어 용접봉을 녹이고 액적을 형성하는 일련의 과정을 반복한다. 지금까지 단락 이행 모드를 규명하기 위하여 FDM이나 MAC(Marker and Cell)방법을 이용한 해석[1-4], 또는 용접 전류의 파형을 제어하여 스페터를 줄이는 연구[5-6] 등이 있었다.

본 연구에서는 VOF (Volume Of Fluid) 방법을 이용하여 단락 이행 모드의 형상을 동적 해석하였다. 용접 전류, 접촉 면적, 용융부 부피, 용접봉 송급 속도 등의 몇가지 용접 인자를 설정하고 이들의 변화에 의해 교락부의 형상, 단락 시간, 속도 분포, 전류 분포 등이 어떻게 영향을 받는지 고찰하였다.

### 2. 금속 단락 이행 모드의 모델링

#### 2.1 지배 방정식

용융 금속은 비압축성 유체이고, 해석하려는 시스템은 열적으로 평형 상태라고 가정하였으며, 온도 변화에 의한 물성치의 변화 및 보호 가스의 Drag force에 의한 변형은 고려하지 않았다. 이러한 가정 아래 금속 이행 현상은 다음의 Navier-stokes 방정식과 연속식에 의하여 표현된다.

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

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial r} + v \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left[ \frac{\partial^2 v}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v}{\partial r} \right] + f_z$$

$$\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{u}{r} = 0$$

#### 2.2 VOF(Volume Of Fluid) 방법

VOF 방법은 단위 셀이 차지하고 있는 유체의 부피 비율을 나타내는 함수 F를 정의하여 자유 표면을 찾아낸다. F는 격자에 유체가 차있는 경우 1이 되고, 유체가 없는 경우 0의 값을 갖게 된다. 따라서 F의 값에 따라 자유 표면이 위치하고 있는 셀을 찾아 낼 수 있으

며, 주변 셀과의 F 값을 비교하여 그 값의 변화가 가장 급격한 방향이 자유 표면의 법선 방향이 되므로 자유 표면의 기울기를 알 수 있다. F 함수를 사용하기 때문에 MAC 방법에 비해 적은 메모리 사용과 알고리즘이 비교적 간단하다는 장점이 있지만 다음 방정식을 추가로 풀어야 한다.

$$\frac{DF}{Dt} = \frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial rFu}{\partial r} + \frac{\partial Fv}{\partial z} = 0$$

### 2.3 전자기력

금속 단락 이행 모드에서 전자기력은 핀치력을 제공하는 힘으로서 매우 중요하다. 본 연구에서는 용융부 상단의 전압은 일정하고, 전압 분포는 axisymmetric 하다고 가정하였다. 전자기력은 다음과 같이 전류 밀도와 자속 밀도에 의해 구하여 진다.

$$\mathbf{F}_m = \frac{\mathbf{J} \times \mathbf{B}}{\rho}$$

자속 밀도는 전류 밀도를 통하여 구해지며, 전류 밀도는 전압 분포에 의하여 구해지므로 전압 분포에 의해 전자기력을 구할 수 있다. 전압 분포는 Laplace 방정식으로 구해진다.

$$\nabla^2 V = 0$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \sigma_c r \frac{\partial V}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \sigma_c \frac{\partial V}{\partial z} \right) = 0$$

### 2.4 초기 조건과 경계 조건

초기 조건으로 용접봉의 직경은 1.2mm, 재질은 연강, 용접봉 송급 속도는 15cm/sec 로 가정하고, 중력과 표면 장력만을 고려하여 일정한 부피를 이룰 때까지 액적을 성장시킨다. 용융풀의 형상은 평면으로 가정하였으며 액적과 모재 용융풀과의 접촉 형상은 접촉부의 반지름을 변화시키며 결정하였다.

초기 형태에 유체 유동 및 전기장에 관한 경계 조건을 Fig.1 과 같이 부여하였다. 용융되지 않은 용접봉의 끝단에 해당하고, 액적의 시작 부분에 해당하는 a 면에서는 용접봉 송급 속도에 해당하는 유체 속도를 부과 하였고, 송급 속도가 0 인 경우 no-slip condition 을 부과 하였다. b,c 면에서는 유동에 의한 유체의 유입, 유출이 없는 free-slip condition 을 가지며, 전류 유입부로 부터 충분히 멀다는 가정 아래, 일정한 전류 밀도  $J_0$  을 가진다. 전류는 a 면을 통하여 들어오고 전압은 일정하다. 입력 전류는 b,c 면을 통하여 나가며 그 외의 자유 표면에서 유체 밖으로의 전류의 출입은 없다.

### 3. 결과 및 고찰

용접 전류는 0~300A, 초기 용융부의 부피는 0.005 ~ 0.01 cm<sup>3</sup>, 접촉 면적의 반지름은 0.01 ~ 0.07 cm, 용접봉의 송급 속도는 0 ~ 20 cm/sec로 변화시켰다. 수치 해석의 기준 조건은 용접 전류 100A, 초기 용융부의 부피 0.01 cm<sup>3</sup>, 접촉면의 반지름이 0.07cm 이고, 용접봉의 송급이 없는 경우를 선정하였다. 사용 격자는 0.001cm의 정방형으로 하였고 전체 격자 크기는 40 × 50 (rxz)으로 통일하였다.

기준 조건에 대한 용융 교락부와 용융풀의 동적 거동을 Fig.2 에 나타내었다. (a)는 초기 상태로서 곡률의 변화에 따른 압력의 차이에 의해 구동력이 발생하며, 시간이 증가함에 따라 (b)와 같이 핀치부가 회복된다. 이 과정에서 교락부의 최대 직경 부분은 위와 아래로 이동하고 접촉면 근처의 용융풀은 위로 빨려 올라오는 흐름을 보인다. 이후 (c)와 (d)에서 볼 수 있는 바와 같이 판성 및 압력 차이에 의해 교락부의 유체는 계속해서 용융풀로 이행한다. 용융 교락부의 이행으로 인해 용융풀에는 회전 유동이 형성되고 용융풀의 표면에는 파동이 발생한다. 유동이 더욱 진행되면 파단이 일어나는데, 이 경우 초기 조건으로부터 파단 될 때까지 걸리는 시간은 6.1 msec 였다. 핀치부는 유동이 진행됨에 따라 점차 아래로 이동하며, 교락부의 중심이 아닌 교락부의 끝 부분에서 파단이 일어난다. 이는 실험 결과와 일치한다[3,4].

6msec 에서의 압력 분포 및 전류 밀도 그리고 전자기력을 Fig.3 에 나타내었다. (a)에서 교락부와 용융부의 접촉 부분이 핀치부가 되고 매우 큰 압력 차이가 발생함을 알 수 있다. 또한 (b)와 (c)에서 알 수 있듯이 핀치부의 직경이 초기에 비해 작아짐에 따라 전류 밀도가 상대적으로 매우 커지고 전자기력의 영향 또한 매우 커짐을 알 수 있다. 이처럼 파단이 일어 나기 직전의 상태에서는 핀치부에서의 압력 차이가 매우 크고 전자기력 또한 크게 작용하므로 외란이 가해져서 균형이 무너지면 스파터가 발생할 가능성이 있음을 보이고 있다.

용접 전류의 변화에 따른 핀치부의 직경 변화를 Fig.4 에 나타내었다. 전자기력에 의한 핀치부의 직경 감소는 단락 이행 후반부에 크게 나타나며, 100A 에서는 전자기력의 영향이 그리 크지 않다. 따라서 100A 이하의 저전류 영역에서는 전자기력의 영향이 크지 않음을 알 수 있다.

기준 조건에서 초기 부피를 변화시키며 핀치부의 직경 변화를 추적한 결과를 Fig.5 에 나타내었다. 같은 접촉 면적을 가짐에도 불구하고 초기 부피가 큰 쪽이 핀치부 회복 속도가 더 큼을 알 수 있다. 이는 부피가 큰 쪽의 초기 형상의 곡률 변화가 작은 쪽보다 심하므로 압력에 영향을 더욱 크게 받아 핀치부 회복 속도가 빠르고 판성에 의한 핀치부 직경 최대 값이 더욱 커지기 때문에 파단에 이르는 시간은 길어진다.

용접 전류와 용접봉 송급 속도의 영향을 Fig.6 에 나타내었다. 일반적으로 용접 전류가 증가함에 따라 전자기력에 의한 핀치 효과에 의해 용융부의 중심에서 이행 속도가 커지므로 파단 시간은 감소하고, 또한 송급 속도가 크면 용접봉으로부터의 유입이 많기 때문에 파단 시간이 증가한다.

용접 전류 및 초기 접촉 면적의 변화에 따른 파단 시간의 변화를 Fig.7 에 나타내었다.

접촉 면적이 클수록 파단 시간은 감소하고, 전류가 커져 전자기력의 영향이 클수록 접촉 면적의 영향은 작아진다. 이는 전자기력이 상대적으로 작은 경우에는 유동의 구동력이 형상에 의한 압력 분포에 의해 지배되며, 전류가 증가함에 따라 전자기력에 의한 영향이 커진다는 것을 의미한다.

#### 4. 결론

(1) VOF 방법을 이용하여 용융부의 표면 형상을 구하였으며 단락 이행 모드의 동적 해석에 효과적으로 적용할 수 있음을 확인하였다.

(2) 단락 이행 모드는 용접 전류가 작은 경우 초기 형상에 의해 용접 전류가 큰 경우 전자기력에 의해 지배된다. 전자기력의 영향은 단락 이행 모드의 말기에 교락부에서 집중적으로 나타난다.

(3) 파단 시간은 용접 전류 및 접촉 면적이 증가할수록, 초기 부피 및 용접봉 송급 속도가 감소할수록 짧아진다.

(4) 파단은 교락부의 끝부분, 즉 교락부와 용융풀과의 접촉부에서 발생한다. 또한 파단되기 직전에 이 부분에서 압력 차이와 전자기력이 매우 커지므로 외란이 발생할 경우 스패터가 발생할 가능성이 높다.

#### 5. 참고 문헌

1. Maruyama, T., Sato, M., and Hida, Y., 1990, "Waveform control in gas shielded arc welding", *Welding International*, Vol. 4, No. 9, pp. 677-683.
2. Maruo, H., Hirata, Y., and Yoshida, K., 1989, "Numerical analysis on the stability of conductive fluid cylinder", *J. of the Japan Welding Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 51-56.
3. Maruo, H., Yoshinori, H., and Yoshida, K., 1989, "Current and time required for breakup of conductive liquid bridge", *J. of the Japan Welding Society*, Vol. 7, No. 4, pp. 57-62.
4. Maruo, H., Hirata, Y., Goto, N., 1992, "Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop", *J. of the Japan Welding Society*, Vol. 10, No. 2, pp. 43-50.
5. Yamamoto, H., Harada, S., and Yasuda, T., 1990, "The development of welding current control systems for spatter reduction", *Welding International*, Vol. 4, No. 5, pp. 398-407.
6. 황주호, 문형순, 나석주, 한광수, 1996, "가스 메탈 아크 용접에서 단락현상 모델링 및 스패터 감소를 위한 전류 파형 선정에 관한 연구", *대한용접학회지*, 14 권, 1 호, pp. 57-67.

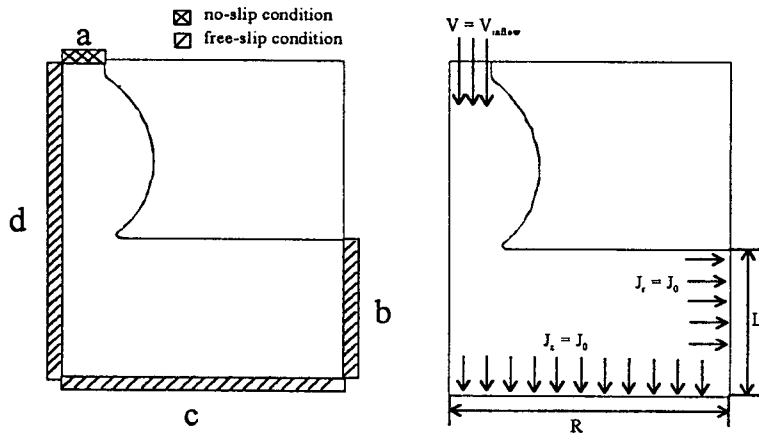


Fig. 1 Initial shape and boundary condition

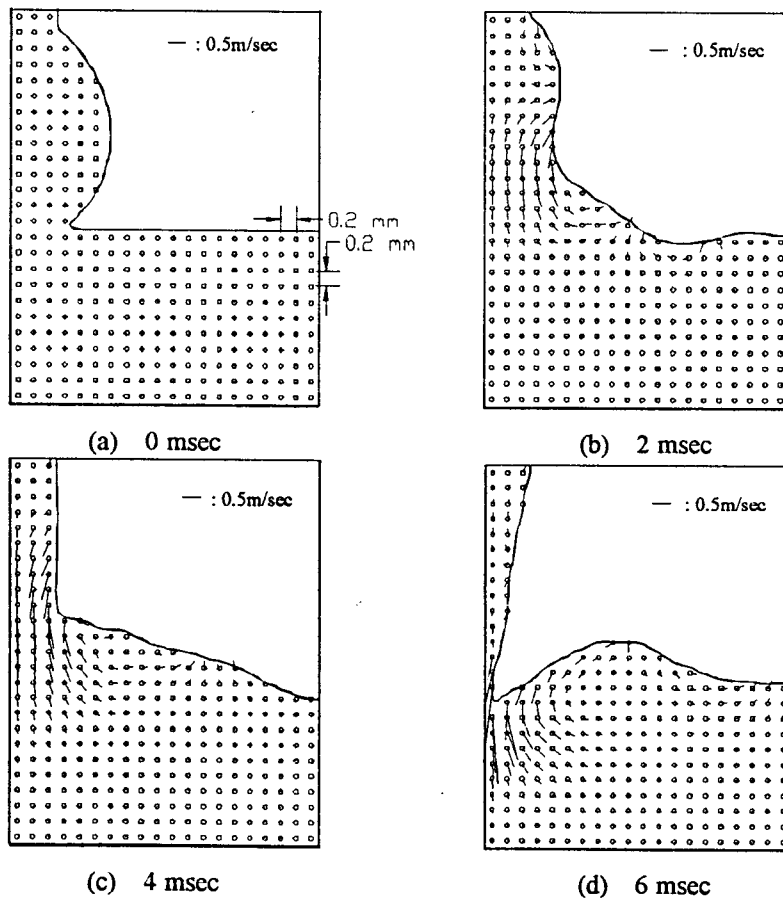


Fig.2 Shape and velocity distribution of molten bridge ( vol. :  $0.01\text{cm}^3$  ,  $I$  : 100A , no wire feed )

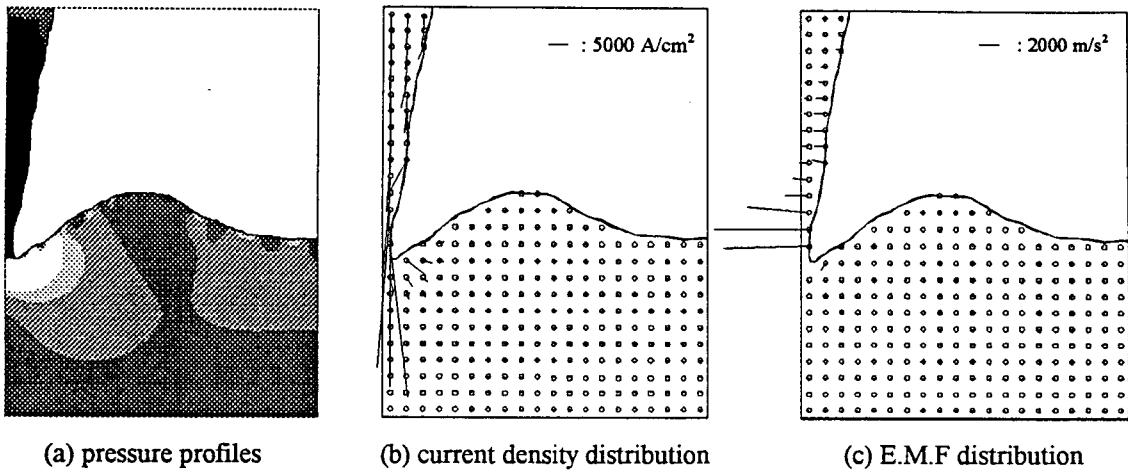


Fig.3 Profile of pressure, current, emf. at 6msec (vol. :  $0.01\text{cm}^3$ , I : 100A, no wire feed,  $r_o$  : 0.07 cm)

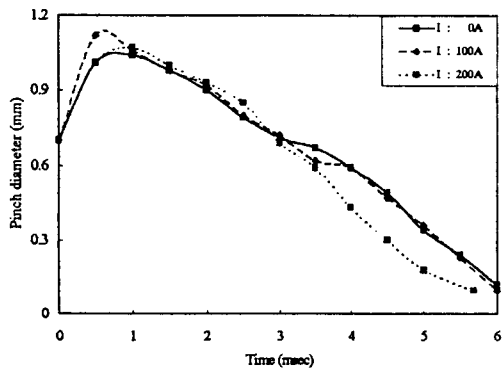


Fig.4 Effects of welding current  
( vol. :  $0.01\text{cm}^3$ ,  $r_o$  : 0.7mm, no wire feed )

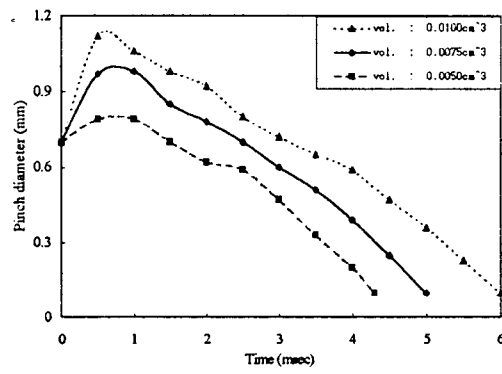


Fig.5 Effects of initial volume  
( I : 100A, no wire feed,  $r_o$  : 0.7mm )

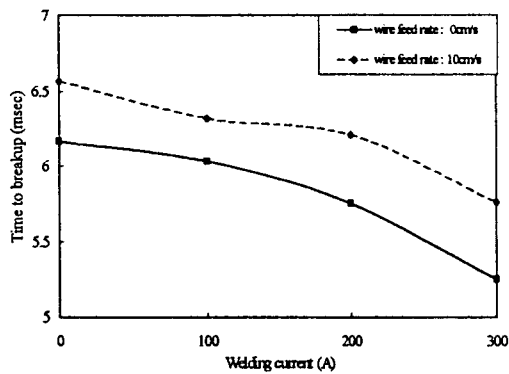


Fig.6 Effect of welding current and wire feed rate (vol. :  $0.01\text{cm}^3$ ,  $r_o$  : 0.7mm )

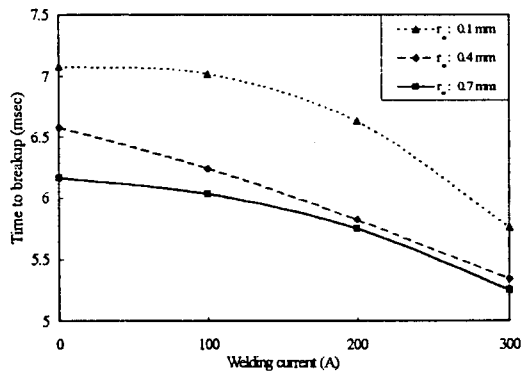


Fig.7 Effect of initial contact radius  
( vol. :  $0.01\text{cm}^3$ , no wire feed )