

펄스 GMA 용접에서 용융 액적의 동특성 및 펄스 조건에 관한 해석

최 상 균* · 강 세 령* · 이 상 룡*

*경북대학교 공과대학 기계공학부

Analysis of Dynamic Characteristics of Molten Drop and Pulse Condition in Pulsed-GMAW

Sang Kyun Choi*, Se Ryeong Kang* and Sang Ryong Lee*

*School of Mechanical Engineering, Kyungpook University, Daegu 702-701, Korea

Abstract

Dynamic behavior of the molten drop during the peak period in the pulsed-GMAW is simulated in this work using the VOF(volume of the fluid) algorithm. The dynamic characteristics of molten drop such as minimum radius, average velocity and displacement of mass center were computed as well as the internal pressure and velocity. The minimum and maximum peak durations for detaching a drop were calculated..

The result of Analysis reveals that peak current and volume of pendant drop are important factors which affecting drop detachment. A simplified model of constant acceleration is proposed to describe the behavior of molten drop during peak current, and its results agree with the experimental results.

(Received November 22, 2001)

Key Words : Pulsed-GMAW, Metal transfer, Drop detachment, Volume of fluid algorithm

1. 서 론

펄스 GMA 용접은 펄스 형태의 용접 전류를 이용하여 펄스 전류를 가할 때마다 하나의 용적이 용접 와이어로부터 모재에 이행이 되도록 함으로서, 금속 이행(metal transfer)을 제어한다. 펄스 전류를 사용하므로 직류 전류에 비하여 모재에 가해지는 입열량이 작고 주기적인 금속 이행으로 인하여 용접부의 질을 향상시킬 수 있으므로 향후 널리 사용될 것으로 예상된다. 고속 카메라를 이용한 실험적인 연구 결과에 의하면 펄스 GMA 용접에서 한 펄스에 한 방울이 규칙적으로 이행되고, 용적의 크기는 용접 와이어의 직경과 유사하며, 용적이 피크 전류 구간(peak current period) 직후에 이행하는 것이 좋다는 것이 알려져 있다¹⁻⁴⁾.

펄스 GMA 용접의 특성을 해석한 기존의 연구¹⁻⁴⁾들은 주로 정적 힘 평형 모델⁵⁾이나 핀치 불안정성 이론⁶⁾과 같은 모델에 의존하고 있다. 이와 같은 금속 이행의 모델에 용접 와이어의 용융을 설명할 수 있도록 에너지

보존식을 추가하여 설명한다. 힘 평형 모델은 축 대칭인 임의의 형상에 대해 해석이 가능하고, 주로 입상 용적 모드를 잘 예측하는 것으로 알려져 있다. 한편 펄스 GMA 용접에서 이탈되는 용적의 크기는 대략 용접 와이어의 지름과 유사하므로 정적 힘 평형 모델을 사용해도 어느 정도 해석은 가능하다고 판단되지만, 용접 전류가 시간에 따라 크게 변화하므로 천이 전류(transition current)보다 높은 고전류 영역에 대해서 정적 힘 평형 모델을 적용하는 것은 문제가 있다. 즉, 높은 펄스 전류가 가해진 경우에는 펄스의 작용 시간에 관계없이 액적이 이탈하는 것으로 잘못 판단될 우려가 있다. 또한 용접 와이어의 용융 금속은 모두 이탈하는 것이 아니고 액적의 이탈 후에도 용융 금속이 잔류하므로 전체 부피가 이탈한다고 가정하는 것에는 한계가 있다. 따라서 정확한 해석을 위해서는 pulsed-GMA 용접에서 시간에 따른 용접 전류 및 용융 금속의 형상 변화를 모두 고려한 동적 해석 방법이 요구된다.

최근에 전산유체역학의 기법 및 VOF(Volume of fluid)법⁷⁾과 같은 자유 표면 기술 알고리즘을 이용하여

용융부를 비정상 유동으로 해석한 연구가 입상용적 및 스프레이 모드, 단락 이행모드 등에 대해 수행되었으며 금속 이행 현상을 보다 정확하게 예측할 수 있는 가능성을 보여 주었다^{8,9)}. 이 해석 방법은 펄스 용접의 동특성에 관해서도 수행되어, 주어진 펄스 파라미터에 대해 액적이 이탈하는 주파수를 구하였고 이를 통하여 한 펄스 한 방울 이행 주파수의 가용 영역을 제안하였다¹⁰⁾. 그러나 이 방법을 사용하면, 이탈 액적의 크기를 원하는 크기로 유지하고자 할 때 펄스 파라미터를 가정하여 금속 이행을 해석하고 이탈되는 액적의 크기를 검토해야 한다. 액적의 크기가 원하는 값이 아니라면 펄스 파라미터를 다시 가정하여 원하는 크기로 이탈할 때까지 시행착오를 반복해야 한다. 자유표면을 고려한 비정상 유동의 해석은 시간이 많이 걸리는 단점이 있으므로 이와 같은 해석은 실제 적용에 어려움이 있다.

본 연구에서는 이와 같은 선행 연구의 한계를 극복하기 위하여 용융부의 크기 등과 같은 초기 조건을 가정하고 펄스 전류를 인가했을 때 용융부의 동특성을 파악하고 이탈이 일어나는 조건을 분석하였다. 동특성의 결과를 이용하여 펄스 GMA 용접의 조건을 결정할 수 있는 단순 모델을 제안하였다.

2. 수치 해석 방법

본 연구에서 수치 해석을 위하여 사용한 가정은 다음과 같다. (1) 용융 금속은 비압축성 유체이며, 물성치는 온도와 무관하게 일정하다. (2) 용적 표면의 전류 밀도는 축 방향을 따라 선형적으로 증가한다. (3) 용접 와이어의 송급 속도는 주어진 용접 조건에서 일정하다. (4) 항력(drag)에 의한 영향은 무시한다. 위의 가정 중에서 선형 전류 밀도 가정은 용적의 아래 부분에서 상대적으로 높은 온도 및 짧은 아크 길이로 인하여 전류 밀도가 위 부분의 표면보다 상대적으로 높아지는 것을 의미한다¹¹⁾. 이와 같은 가정 하에서 용융부는 다음과 같이 연속식, 운동량식, 자유표면을 표현하는 부피 분율 F 에 관한 식 그리고 전압 분포 V 를 나타내는 라플라스 방정식에 의해 해석될 수 있다.

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

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \\ \nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] &+ \frac{f_z}{\rho} \\ \frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} &= 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\nabla^2 V = 0 \quad (4)$$

식 (4)에 의해 계산된 전압 분포를 바탕으로 식 (5), (6)을 통하여 전류 밀도 J 를 계산하고 식 (7)을 사용하여 θ 방향의 자속 밀도 B_θ 를 계산할 수 있다. 단위 부피당 전자기력 F_m 은 식 (8)과 같이 전류 밀도와 자속 밀도의 벡터 곱을 취함으로써 계산된다.

$$J_r = -\sigma \frac{\partial V}{\partial r} \quad (5)$$

$$J_z = -\sigma \frac{\partial V}{\partial z} \quad (6)$$

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (7)$$

$$F_m = J \times B \quad (8)$$

여기에서 μ_0 는 투자율(permeability), J 는 전류 밀도, V 는 전압, σ 는 전기 전도도, B 는 자속 밀도 그리고 F_m 은 전자기력을 나타낸다.

본 해석은 SOLA-VOF⁷⁾ 프로그램에 전자기력의 영향을 고려하여 수행되었으며 주어진 형상에 대하여 전자기력, 압력 분포 및 속도 분포를 구하고 전자기력을 계산한다. 이후, 시간을 증가시키며 속도 분포에 따른 형상의 변화를 계산하며 이 과정을 반복하게 된다.

액적의 이탈에 영향을 미치는 변수로는 베이스 및 피크 전류의 크기와 피크 전류가 가해지기 시작할 때의 용융부의 크기, 내부 유속, 용융 속도 등을 들 수 있다. 일반적으로 베이스 전류는 천이 전류보다 낮은 값이 사용되며, 이 때의 용융부 내부 속도는 느리고 높은 피크 전류가 가해지면 급속히 가속되는 것으로 알려져 있으므로¹⁰⁾ 본 연구에서는 초기 조건으로 액적의 크기 및 피크 전류를 가장 중요한 요인으로 분석하고자 하였다. 해석에 적용한 용접 조건은 기존 실험 결과¹⁾와 비교를 위하여, 직경 1.6mm의 강 용접 와이어 및 아르곤 보호가스를 사용하는 경우로 하였다. 베이스 전류는 150A로 가정하였으며 베이스 전류 하에서 용융부를 일정한 크기까지 성장시켰고 이를 초기조건으로 하여 피크 전류가 가해졌을 때의 용융부의 거동을 관찰하였다. 용융부의 초기 부피는, 같은 부피의 구로 환산하였을

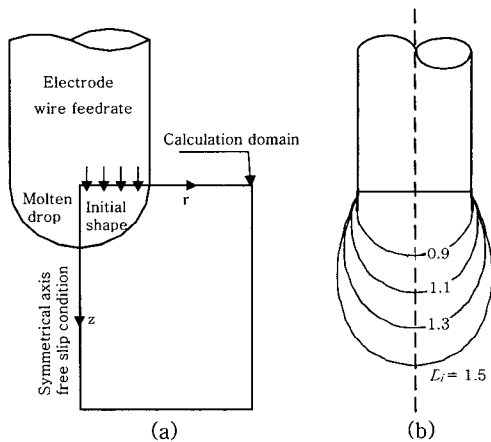
때의 지름을 용접 와이어의 지름으로 무차원화한 것을 식 (9)와 같이 환산 직경(Equivalent Dimensionless Diameter, D_i)로 정의하여 0.9 - 1.5로 변화하도록 하였다.

$$D_i = \frac{d_i}{d_w} \quad (9)$$

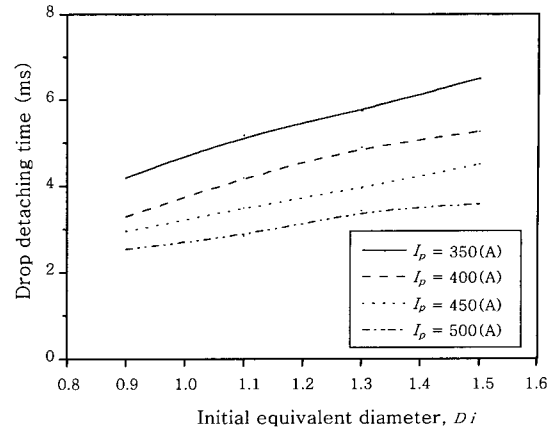
여기에서 d_i 는 초기 용융부의 부피를 같은 체적의 구로 환산하였을 때의 직경이고, d_w 는 용접 와이어의 직경을 나타낸다. 초기 조건으로 계산된 형상과 경계조건을 Fig. 1에 나타내었다. 한편 용접 와이어의 용융 속도는 7cm/s의 값을 사용하였고 피크 전류는 350A에서 500A까지 50A간격으로 변화시키며 동 특성을 해석하였다.

3. 용융 액적의 이탈 시간 및 용융부의 거동

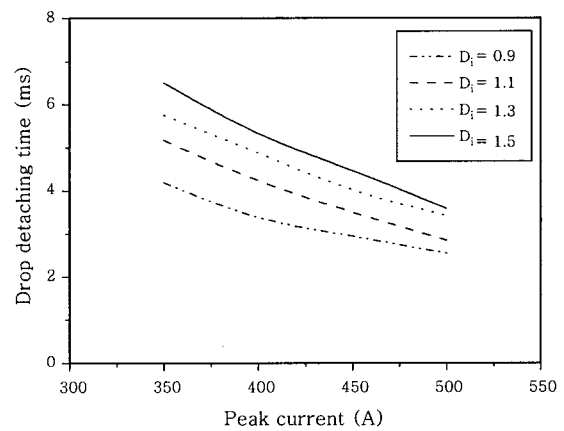
피크 전류가 가해졌을 때, 용융 액적의 이탈시간은 피크 전류의 크기와 피크 전류가 인가될 때의 조건, 즉 용융부의 크기, 용융부 내부의 속도 분포 등에 따라 변화한다. 일반적으로 베이스 전류는 100 - 150A로서 낮고, 이 때의 속도 분포는 피크 전류 구간과 비교하여 매우 작으므로, 액적의 이탈 소요 시간은 주로 용융부의 부피와 피크 전류에 의하여 영향을 받는다. 피크 전류가 가해질 당시의 용융부의 부피를 초기 조건으로서 변화시키며 다양한 피크 전류에 대하여 액적이 이탈될 때까지 소요되는 시간을 계산하여 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 같은 피크 전류 하에서 초기 용융부의 부피가 클수록 용융부를 가속시키기가 어려우므로 이탈에 소요되는 시간은 증가하며, 같은 초기 부피에서는 피크 전류의 값이 클수록 전자기력이 크



(a) Boundary conditions and calculation domain
 (b) Initial shape with respect to variable volume
Fig. 1 Boundary conditions and initial shapes



(a) Effect of initial volume



(b) Effect of peak current

Fig. 2 Calculated drop detaching time

로 이탈 소요 시간이 감소한다.

용융부는 액적이 이탈하고 난 후에도 용융 금속이 잔류하게 되는데 따라서 초기 부피와 이탈되는 액적의 부피에는 차이가 발생하게 된다. Fig. 3에 초기 부피에 대한 이탈 액적의 크기를 직경의 비율로 환산하여 나타내었다.

$$D_d = \frac{d_d}{d_w} \quad (10)$$

$$\alpha = \frac{D_d}{D_i} = \frac{d_d}{d_i} \quad (11)$$

여기에서 d_d 는 이탈되는 액적을 구로 환산한 직경이며 D_d 는 이를 용접 와이어의 직경으로 무차원화한 값이다. 펄스가 인가될 때 초기 부피가 작은 경우에는 액적이 이탈하고 난 후 잔류하는 용융부의 부피가 상대적으로 크며 초기 부피가 큰 경우에는 잔류 용융부의 부피 비율이 작아진다. 한편, 초기 환산 직경 D_i 가 1.1인 경우에는 이탈하는 액적의 D_d 가 1에 근접하여 용접 와이어의 직경과 같았다.

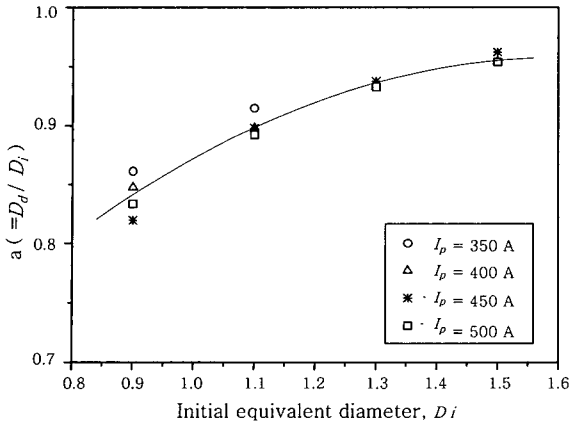
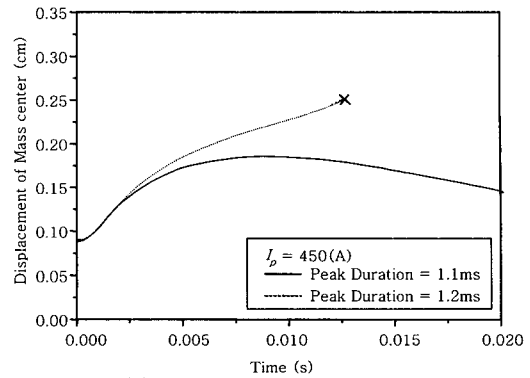


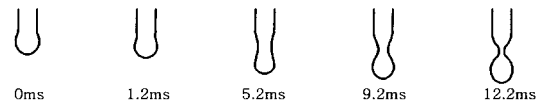
Fig. 3 Ratio of detaching drop diameter with respect to initial equivalent diameter

만일 피크 구간이 매우 짧다면 용융부는 피크 구간이 종료된 후에 이탈하지 못하고 다시 구와 유사한 형태로 회복된다. 피크 구간을 증가시키면 용융부는 피크 전류 구간이 종료되고 전류가 감소하여도 관성에 의하여 이탈된다. 더욱 피크 구간을 증가시키면 용융부는 피크 구간 중에 이탈될 것이다. 초기 부피가 환산 직경 1.3 이고 펄스 전류가 450A인 경우 펄스 지속시간에 따른 용융부 무게 중심의 변위를 Fig. 4에 나타내었다. Fig.4(a)의 실선은 초기상태에서 1.1ms동안 450A의 피크 전류를 가하고 그 후에는 베이스 전류인 150A로 전류를 감소시키고 그대로 유지시켰을때, 무게 중심의 변위를 추적한 것이다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 피크 전류가 가해진 후에 8ms정도까지 무게 중심이 +z축 방향으로 이동하여 용융부가 길게 늘어지지만, 액적의 이탈에는 이르지 못하고 무게 중심이 -z방향으로 이동하여 다시 구와 유사한 형상으로 회복된다. 반면에 1.2ms동안 피크 전류를 가한 경우(점선)에는 용융부가 지속적으로 +z축 방향으로 이동하며 약 12ms가 경과한 후에 이탈하였다. 이 경우 용융부의 무게 중심의 변위는 베이스 전류로 바뀌는데도 지속적으로 +z 방향으로 증가한다. 따라서 이 경우는 비록 시간은 오래 걸렸지만 피크에 의해서 액적이 이탈했다고 할 수 있고, 용융부를 이탈 시키는 임계 피크 시간이 된다. Fig. 4(b)와 (c)는 이 때의 용융부 형상의 변화를 나타낸다.

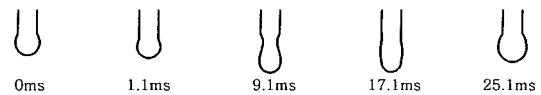
한편 피크 구간을 너무 크게 하면 용융부가 이탈한 후에 스프레이 모드와 유사하게 추가로 작은 액적이 이탈할 수 있다. 따라서 하나의 펄스에 하나의 액적이 이탈하는 규칙적인 금속 이행을 얻을 수 있는 피크 전류 구간은 최소값과 최대값이 존재한다. 본 연구에서 펄스 구간의 최대값은 액적이 이탈할 때까지의 시간으로 정하였다. 해석 결과에 따르면 피크 전류 구간을 최소와



(a) Displacement of molten drop



(b) Behavior of molten drop (peak duration = 1.2ms)



(c) Behavior of molten drop (peak duration = 1.1ms)

Fig. 4 Critical pulse duration for detaching a drop ($D_i = 1.3$)

최대값 사이에서 선택하면 액적을 이탈시킬 수 있으나, 실험을 통하여 펄스 용접에서 한 펄스 한 방울의 규칙적인 금속 이행을 얻기 위해서는 액적의 이탈이 피크 구간이 끝날 때에 일어나는 것이 적합하다는 것이 알려져 있으므로 실제 적용에 있어서는 최소보다 최대값에 가깝도록 피크 전류 구간을 조정하는 것이 더 나을 것으로 판단된다.

350A~500A의 피크 전류가 가해졌을 때 용융부의 최소 반경, 축 방향 평균 속도 그리고 무게 중심의 변위의 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 피크 전류가 증가할수록 z 축 방향의 속도는 증가하며 용융부의 최소 지름도 급격히 감소하여 빨리 이탈하게 된다. 그리고 Fig. 5(b)에서 볼 수 있는 바와 같이 동일한 피크 전류에서는 용융부의 형상 변화에도 불구하고 이탈될 때까지 가속도가 대체적으로 일정하였다. 또한 같은 초기 부피에 대해서 이탈할 때까지 이동한 무게 중심의 변위는 Fig. 5(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 피크 전류의 변화에 따라 대체적으로 일정하였다. 이러한 해석 결과들을 토대로 피크 전류 구간에서 용융 액적의 거동은 등가속도 운동으로 가정할 수 있으며 일정 변위를 이동하고 이탈하는 것으로 생각하여 적절한 펄스 시간을 계산할 수 있을 것으로 판단된다. Fig. 5(d)에는 용융부의 여러 초기 부피에 따라 용융 액적이 이탈될 때까지 이동하는 무게 중심의 변위를 피크 전류에 대하여 평균하여 나타

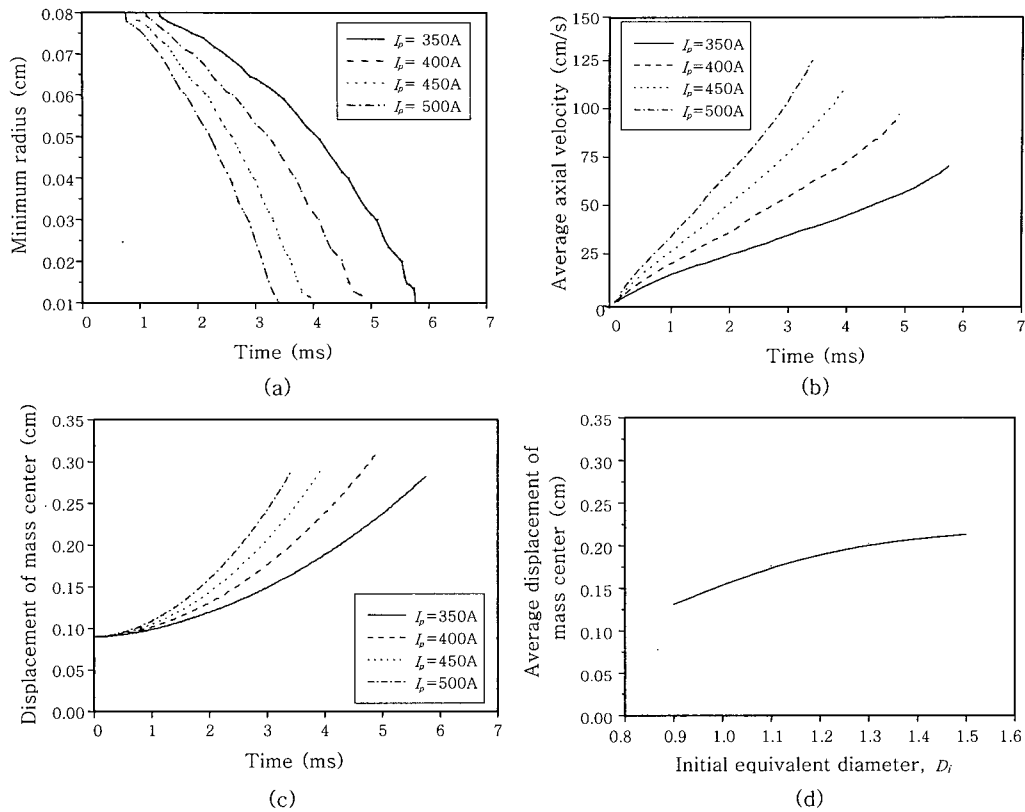


Fig. 5 Dynamic behaviors of molten drop at peak duration ($D_i = 1.3$)

낸 것이다. 초기 부피가 작으면 이탈 액적의 크기가 작으므로 이탈할 때까지 무게 중심의 이동 거리는 작다. 이탈 액적의 부피가 커질수록 액적이 이탈할 때까지 이동하는 거리는 증가하게 된다.

4. 단순 모델을 이용한 액적 이탈 조건의 결정 및 실험 값과의 비교

앞에서 언급한 바와 같이 펄스 전류 하에서의 용융 액적의 거동은 등가속도 운동으로 가정할 수 있다. 이 가속도는 피크 전류 하에서 용융 액적에 가해지는 축방향의 힘을 통하여 구할 수 있다. 특히 피크 전류 하에서는 전자기력의 영향이 가장 지배적이므로 본 연구에서는 식 (12)와 같은 정적 힘 평형 이론⁵⁾의 전자기력을 이용하여 가속도를 구하여 보았다.

$$F_m = \frac{\mu_0 I_p^2}{4\pi} \left\{ \ln \frac{2b \sin \theta}{d_w} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right\} \quad (12)$$

여기에서 I_p 는 피크 전류이고 d_w 는 용접 와이어의 직

경, b 는 초기 형상의 직경을 나타낸다. θ 는 아크의 방출 각도로서 본 연구에서는 90도로 가정하였다. 가속도 a 는 전자기력을 초기 질량으로 나누어 계산할 수 있다.

$$a = \frac{F_m}{m} = \frac{6F_m}{\pi \rho d_i^3} \quad (13)$$

여기에서 m 은 초기 질량, ρ 는 용융 금속의 밀도를 나타낸다.

등가속도 운동에서 이탈시간을 예측하기 위해서는 액적 무게 중심의 이동 거리에 관한 정보가 필요하다. 만일 액적의 이탈 후에 잔류되는 용융부의 부피를 알고 있다면 이탈하는 액적은 구로 가정하고, 남아있는 용융부를 원뿔 형태로 단순화 함으로써 액적의 이동 거리를 근사적으로 계산할 수 있다. 이와 같은 단순 모델을 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 용융 액적 무게 중심의 이동 거리를 s 라고 하고 베이스 전류 구간에서 용융부의 속도를 무시하면 액적의 이탈 시간 t_p 및 이동 거리 s 는 다음과 같이 계산된다.

$$t_p = \sqrt{\frac{2s}{a}} \quad (14)$$

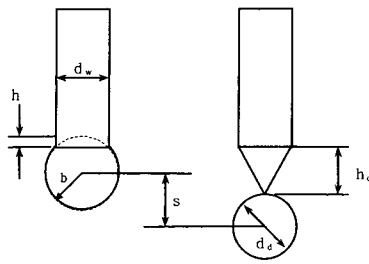


Fig. 6 Simplified model of drop detachment

$$s = \frac{d_d}{2} + h_c - (b - h) \tag{15}$$

d_d 는 이탈 액적의 직경으로서 원하는 금속 이행을 얻기 위하여 정해진 값이며 h_c , b , h 는 다음 식들을 통하여 구할 수 있다

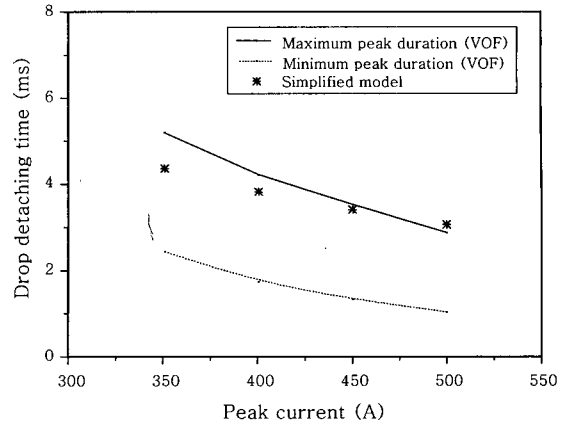
$$h_c = 2D_i^3 d_w (1 - \alpha^3) \tag{16}$$

$$\frac{2}{3} \pi b^3 + \frac{1}{3} \pi \sqrt{b^2 - \left(\frac{d_w}{2}\right)^2} \left\{ 2b^2 + \left(\frac{d_w}{2}\right)^2 \right\} - \frac{\pi d_i^3}{6} = 0 \tag{17}$$

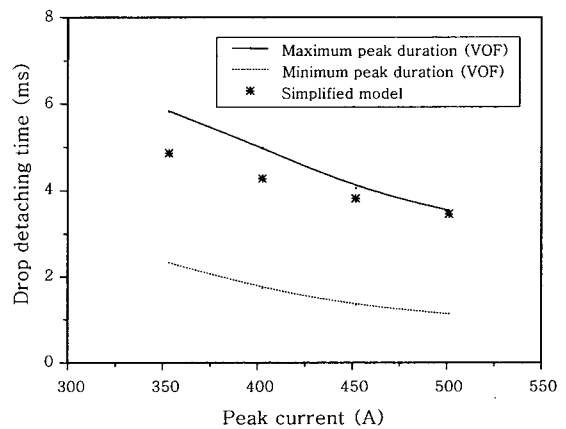
$$h = b - \sqrt{b^2 - \left(\frac{d_w}{2}\right)^2} \tag{18}$$

Fig. 7에 환산 직경이 1.1과 1.3인 경우에 대하여 피크 전류를 변화시키며 최소 펄스 시간과 최대 펄스 시간을 나타내었고 정적 힘 평형 이론의 전자기력과 단순 모델을 적용하여 등가속도 운동으로 계산한 이탈 시간을 함께 비교하였다. Fig. 7에서 볼 수 있는 바와 같이 정적 힘 평형 이론의 z 방향 전자기력만으로 구한 이탈 시간과 VOF방법을 통하여 계산된 펄스구간은 상당히 일치하며, 복잡한 VOF 알고리즘을 적용하지 않고도 간단하게 액적의 가속도 및 이탈 시간을 계산할 수 있다. 이는 피크 구간에서는 전류가 매우 높으므로 다른 힘들, 즉 표면장력과 중력 등의 영향이 상대적으로 작기 때문인 것으로 판단된다.

단순 모델과 실제 실험 결과를 비교하기 위하여 실험 결과¹⁾를 참조하였다. 가용 실험에서는 1.6mm 직경의 강 용접와이어를 사용하고 있으며 베이스 전류 180A, 피크 전류를 400, 500A로 하고 다양한 펄스 주파수에 대하여 금속 이행을 관찰하고 있다. 또한 load duty cycle, β 및 피크 전류에 대하여 하나의 펄스에 하나의 액적이 이탈하는 주파수의 영역을 나타내고 있으므로 비교가 용이하다. 여기서 β 는 펄스의 한 주기 내에서 피크 구간이 차지하는 비율로서 이 값이 일정하면



(a) $D_i = 1.1$



(a) $D_i = 1.3$

Fig. 7 Calculated peak duration time for detaching drop with variable peak currents

펄스 주파수가 변화하더라도 평균 용접 전류가 일정하게 고정된다.

가용 실험 결과와 단순 모델로 계산한 결과를 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 주파수가 변경되면 피크 전류 구간이 함께 변화하므로 이로부터 피크 전류 구간의 범위를 구하였다. 또한 실험 결과에 따르면 β 와 피크 전류가 일정한 경우, 펄스 주파수가 변경되면 평균 전류는 일정하지만 베이스 구간이 변화하게 되므로 이탈 액적의 크기는 변화하게 된다. 본 연구에서는 제안된 단순 모델을 이용하여 실제 용접에 적용될 수 있는 범위의 초기 부피($D_i = 0.9 \sim 1.5$)를 가정하고 피크 전류를 변화시키며 이탈시간을 계산하여 실험과 비교하였다. Fig. 8에서 볼 수 있는 바와 같이 실험에서 관찰된 펄스 구간의 영역 내에 해석의 결과가 분포하며, 이는 단순 모델을 통하여 계산한 피크 구간을 사용할 경우에 하나의 펄스에 하나의 액적이 규칙적으로 이탈할 수 있음을 의미한다.

본 연구에서 제안된 방법으로 펄스 조건을 계산하는 방법을 정리해 보면 우선 원하는 이탈 액적의 크기, 베이스 전류, 피크 전류를 결정한다. 해당 크기의 액적을

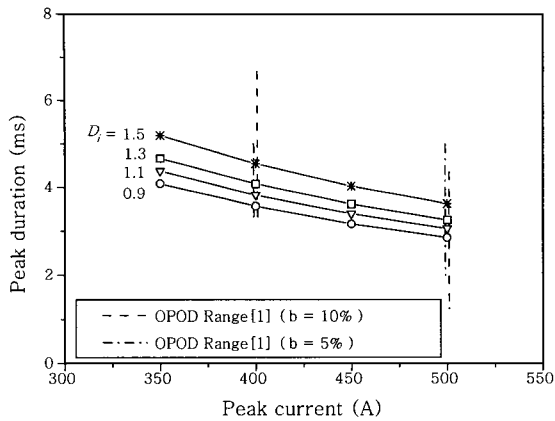


Fig. 8 Comparison of experimental and calculated peak duration

이탈시키기 위한 초기 부피를 Fig. 3을 통하여 계산하고 식(12)를 이용하여 피크 전류 하의 전자기력을 계산한다. 식(13)을 이용하여 가속도를 계산한 후 Fig. 6과 등가속도운동 식(14)를 이용하여 피크 구간의 시간을 계산할 수 있다. 베이스 구간은 해당 베이스 전류에서 이탈 액적의 부피만큼 용융시키는 시간으로 정할 수 있다. 이렇게 비교적 간단한 방법으로 원하는 크기의 액적을 이탈시키는 피크 시간을 결정할 수 있으며 이 결과는 VOF법을 도입한 본격적인 수치 해석 방법의 결과와 매우 유사하다. 본 연구에서 베이스 전류는 천이 전류 이하에서 충분히 작은 것으로 가정하였으므로 그 영향을 무시하였지만, 만일 베이스 전류가 큰 경우에는 베이스 구간에서 발생한 가속도의 값이 피크 구간에 영향을 주게 되므로 피크 구간이 짧아질 것으로 예상된다. 또한 용접기의 전원부 특성에 따른 변화와 와이어 돌출길이 등에 의한 변화를 고려하지 못한 단점이 있으므로 실제 현장에 적용을 위해서는 추가의 연구가 요구된다.

5. 결 론

본 연구에서는 펄스 GMAW에서 발생하는 금속 이행의 동적 특성을 VOF알고리즘을 이용한 수치해석을 통하여 예측해 보았다. 피크 전류가 가해질 때는 피크 전류의 크기 및 초기 부피에 따라 변하지만 이탈 과정 중 용적의 형상 변화에 대해서는 대체적으로 일정하였다. 따라서 베이스 전류 구간에서 형성된 특정 부피의 용융부에 대하여 피크 전류 하에서의 가속도는 액적의 이탈 시간을 결정하는 파라미터로 활용될 수 있다. 한편 피크 구간에서 전자기력이 가장 지배적인 힘임을 감안하여 z 방향의 전자기력을 이용하여 가속도를 계산해 본 결과 VOF를 도입한 수치해석 결과와 상당

히 근접한 결과를 얻을 수 있었으며, 이를 이용하여 피크 구간에서 액적의 이탈을 모사하는 간단한 모델을 제안할 수 있었다. 제안된 모델을 가용 실험 결과¹⁾와 비교해 본 결과, 하나의 펄스에 하나의 액적이 이탈되는 피크 인가 시간 영역 내에 해석 결과의 값이 분포되어 일치하는 결과를 나타내었다. 본 연구에서 제안된 단순 모델을 사용하면 복잡한 수치 해석 방법이나 실험들을 사용하지 않고 원하는 크기의 액적이 이탈하는 펄스 조건을 얻을 수 있다.

참 고 문 헌

1. Y. S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, (1989), Ph. D Thesis, M.I.T
2. J. H. Waszink and M. J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, *Welding Journal*, **65(11)** (1986), 289s-298s
3. S. Ueguri, K. Hara and H. Komura : Study of metal transfer in pulsed GMA welding, *Welding Journal*, **64** (1985), 242s-250s
4. L. F. Lancaster, *The physics of welding*, 2nd ed., (1985), Pergamon press
5. J. C. Amson : Lorentz force in the molten tip of an arc electrode, *Br. J. Appl. Phys.* **16** (1965), 1169-1179
6. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability . Part 1. Varicose instability in a current-carrying cylinder with surface charge, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **18** (1985) 1431-1446
7. B. D. Nichols, C. W. Hirt and R. S. Hotchkiss : SOLAVOF: A Solution algorithm for transient fluid flow with multiple free boundaries, Los Alamos National Lab Report No. LA-8355 (1980)
8. S. K. Choi, C. D. Yoo, Y. -S. Kim : Dynamic analysis of metal transfer in GMA welding using VOF Method : Part 1: Globular and spray transfer modes, *J. of KWS*, **15(3)** (1997), 168-178 (in Korean)
9. S. K. Choi, S. H. Ko, C. D. Yoo and H. J. Kim : Dynamic analysis of metal transfer in GMA welding using VOF Method : Part 2: Short-circuit transfer mode, *J. of KWS*, **15(3)** (1997), 179-187 (in Korean)
10. S. K. Choi, C. D. Yoo, S. G. Park : Dynamic Analysis of Metal Transfer in Pulsed-GMAW, *J. of KWS*, **15(5)** (1997) 458-465 (in Korean)
11. V. A. Nemchinsky : Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **27** (1994), 1433-1442
12. C. H. Lee, H. J. Kim and B. Y. Kang : Effect of delay time control on the spatter generation in CO₂ welding, *J. of KWS*, **17(5)** (1999) 325-332 (in Korean)