

# 수치해석을 이용한 펄스 용접 조건의 결정

## Determination of pulse condition in GMA welding using numerical analysis

최상균, 강세령, 이상룡  
경북대학교 공과대학 기계공학부

### 1. 서론

Pulsed-GMA 용접은 펄스(pulse) 형태의 용접 전류를 이용하여 펄스 전류를 가할 때마다 하나의 용적이 용접봉으로부터 모재에 이행이 되도록 함으로써, 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. Pulsed-GMAW의 특성을 해석한 기존의 연구 결과를 보면 힘 평형 모델과 pinch instability 이론과 같은 금속이행 모델과 용융을 위해 에너지 보전식을 이용하고 있다<sup>1,3)</sup>. 힘 평형 모델의 적용은 일반적으로 입상용적(globular) 모드에 한정되어 있지만, 축 대칭인 입의의 형상에 대한 해석이 가능하고 용적 이탈 현상이 스프레이 모드의 초기인 projected 모드와 유사하므로 힘 평형 모델을 사용하여 어느 정도 예측이 가능하다. 그러나 펄스 전류는 입상용적과 스프레이(spray) 모드의 전류 범위에서 변화하기 때문에 힘 평형 모델을 천이 전류(transition current) 이상의 고전류 영역에 대하여 적용하는 것은 문제가 있다. 또한, 기존의 해석 방법은 정적인 해석이므로 pulsed-GMAW의 펄스 전류 변화에 따른 금속이행의 동적 해석 방법이 요구된다. 본 연구에서는 이미 금속 이행의 해석에서 사용되고 있는<sup>4,5)</sup> Volume of Fluid(VOF)<sup>5)</sup>법을 이용하여 원하는 금속 이행을 얻을 수 있는 펄스 조건을 결정하는 것이 목적이다.

### 2. 해석 조건

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) 용접봉의 송급 속도는 주어진 용접 조건에서 일정하다. (4) Drag에 의한 영향은 무시한다. 위의 가정 중에서 선형 전류 밀도 가정은 용적의 아래 부분에서 높은 아크 온도로 인하여 전류 밀도가 위 부분보다 상대적으로 높아지는 것을 의미한다<sup>7)</sup>.

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 용접봉의 지름으로 나눈 것을 Equivalent Dimensionless Diameter로 정의하여 0.9 - 1.5의 환산 직경을 갖도록 가정하였고 피크 전류는 350A에서 500A까지 변화시켰다.

### 3 용융 액적의 이탈 시간

피크 전류가 가해졌을 때, 용융 액적의 이탈시간은 피크 전류의 크기와 피크 전류가 인가될 때의 조건, 즉 용융부의 크기, 용융부 내부의 속도 분포 등에 따라 크게 변화한다. 베이스 전류는 100 - 150A로서 낮고, 이 때의 속도 분포는 피크 전류 구간과 비교하여 매우 작으므로, 액적의 이탈 소요시간은 주로 용융부의 부피와 피크 전류에 의하여 영향을 받는다. 피크 전류가 가해질 당시의 용융부의 부피를 변화시키며 다양한 피크 전류에 대하여 액적이 이탈될 때까지 소요되는 시간을 계산하여 Fig.1에 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이 같은 피크 전류하에서 초기 용융부의 부피가 클수록 용융부를 가속시키기가 어려우므로 이탈 소요시간은 증가하며, 같은 초기 부피에서는 피크 전류의 값이 클수록 전자기력이 크므로 이탈 소요시간은 감소한다. 한편 환산 직경이 1.1인 경우에는 용융부에서 이탈하는 액적의 부피를 구로 환산했을 때의 직경이 용접봉의 지름과 거의 일치하였다.

만일 피크 구간이 매우 짧다면 용융부는 피크 구간이 종료된 후에 이탈하지 못하고 다시 구형으로

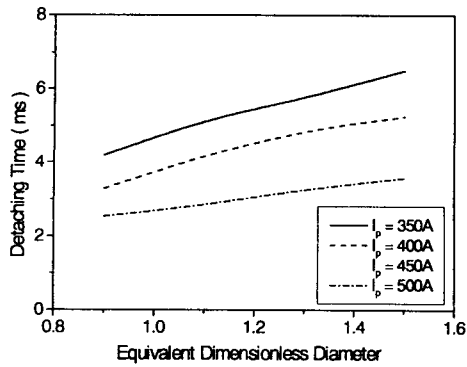
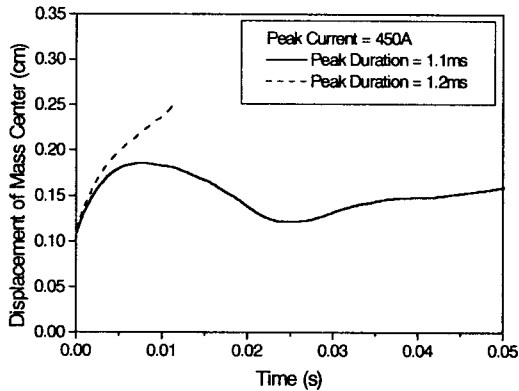


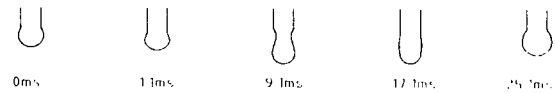
Fig. 1 The effect of initial volume and peak current on drop detaching time



(a) Displacement of Mass Center



(b) Change of molten drop shape (  $T_p = 1.1ms$  )



(c) Change of molten drop shape ( $T_p=1.2ms$ )

Fig.2 Critical pulse duration for detaching a drop (Minimum pulse duration)

한편 피크 시간을 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 최대값 사이에서 선택하면 액적을 이탈시킬 수 있으나, 실험을 통하여 펄스 용접에서 1 펄스 1 액적의 규칙적인 금속 이행을 얻기 위해서는 피크 전류가 가해진 직후에 액적의 이탈이 일어나는 것이 적합하다는 것이 알려져 있으므로 실제 적용에 있어서는 최소보다 최대값에 가깝도록 피크 전류 구간을 조정하는 것이 더 나을 것으로 판단된다.

#### 4. 펄스 전류 하에서의 용융부의 거동

350A~500A의 피크 전류가 가해졌을 때 용융부의 최소 반경, 축 방향 평균 속도 그리고 무게 중심의 변위의 변화를 Fig.3에 나타내었다. 피크 전류가 증가할수록 z 축 방향의 속도는 증가하며 용융부의 최소 지름도 급격히 감소하여 빨리 이탈하게 된다. 그리고 Fig.3(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.3(c)에서 볼 수 있는 바와 같이 피크 전류와 상관없이 대체적으로 일정하였다.

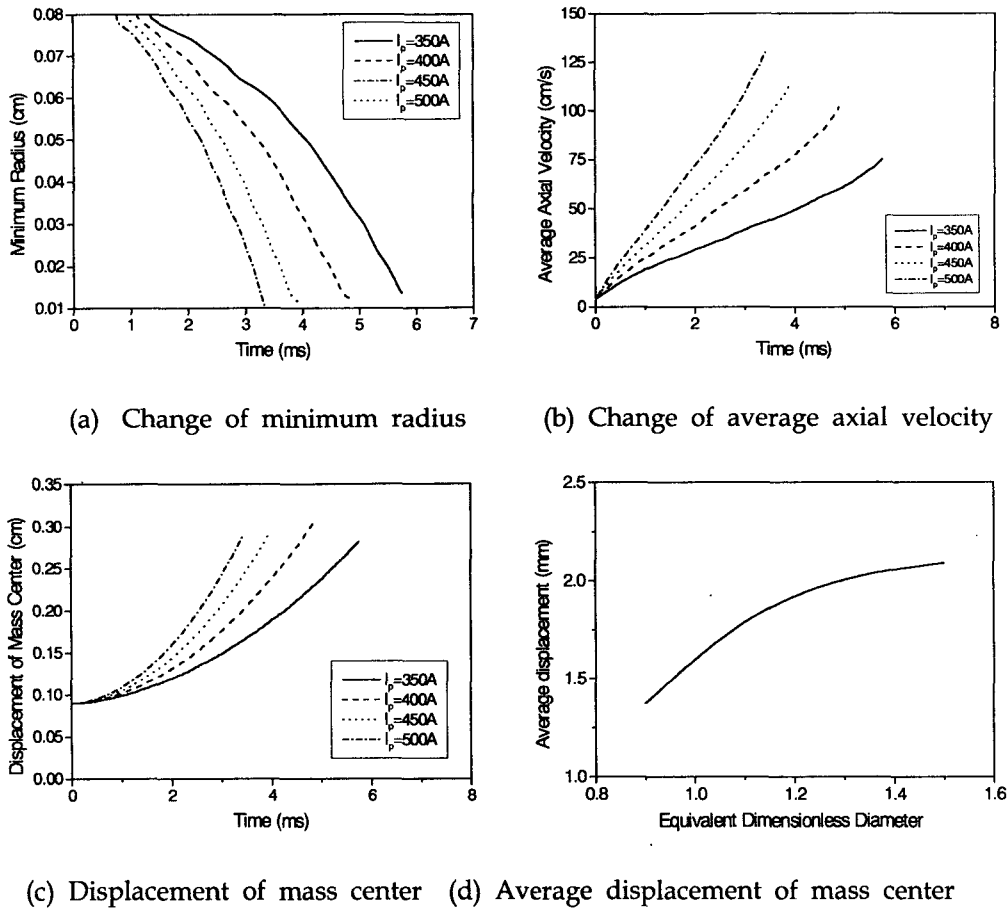


Fig.3 Dynamic behaviors of pendent drop at peak duration

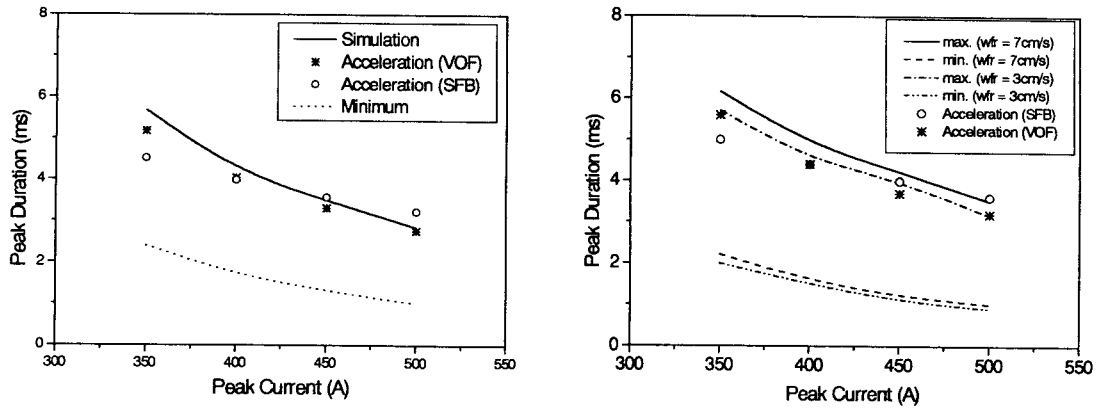
Fig.3(d)는 용융부의 초기 부피에 따라 용융 액적이 이탈될 때까지 이동하는 무게 중심의 변위를 다양한 피크 전류의 경우를 평균하여 나타낸 것이다. 이를 토대로 피크 전류 구간에서 용융 액적의 거동은 등가속도 운동으로 가정할 수 있으며 일정 변위를 이동하고 이탈하는 것으로 생각하여 적절한 펄스 시간을 계산할 수 있다.

### 5. 펄스 조건의 결정

Fig.4에 환산 직경이 1.1과 1.3인 경우에 대하여 피크 전류를 변화시키며 최소 펄스 작용 시간과 최대 펄스 작용 시간을 나타내었다. 최소 펄스 구간은 펄스 전류를 0.1ms간격으로 작용시켜 보고 무게 중심의 변위가 감소하지 않고 지속적으로 증가하여 이탈하는 시간을 구하였다. 최대 펄스 구간은 펄스 전류가 가해진 상태에서 액적이 이탈할 때까지의 시간으로 정하였다. 한편 앞에서 기술한 바와 같이 용융 액적의 거동은 등가속도 운동과 유사하므로 Fig.3(b)에서 가속도를 계산하고 Fig.3(d)의 용융부 평균 이동거리를 통하여 이탈하는 시간을 계산하여 Fig.4에 함께 나타내었다.

그리고 크기의 비교를 위하여 정적 힘평형 이론의 z 방향의 전자기력을 용융부의 질량으로 나누어 가속도를 구하고, 등가속도 운동으로 계산한 이탈 시간을 함께 표시하였다. 정적 힘 평형 이론의 z 방향 전자기력의 계산에서 아크 방출 각도는 90도로 가정하였다.

Fig.4에서 볼 수 있는 바와 같이 정적 힘평형이론의 z 방향 전자기력만으로 구한 펄스 구간과 VOF 방법을 통하여 계산된 펄스구간은 상당히 일치하며, 복잡한 VOF알고리즘을 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.



(a) Equivalent dimensionless diameter = 1.1 (b) Equivalent dimensionless diameter = 1.3  
 Fig.4 Proposed range of peak duration

## 5. 결론

기존 연구 결과<sup>4)</sup>에서 볼 수 있는 바와 같이 Pulsed-GMAW에서 발생하는 금속 이행의 동적 특성은 VOF알고리즘을 도입한 수치해석을 통하여 예측될 수 있으며 계산 결과로 구한 펄스 주파수의 허용 범위는 실험 값과 비교적 잘 일치한다. Pulsed-GMAW의 금속 이행은 피크 전류 구간에서 용적 이탈에 필요한 관성력을 얻기 위하여 높은 축 방향의 속도와 가속도가 요구되며, 이를 발생시키기 위하여 충분한 피크 전류나 지속 시간이 필요하다. 피크 전류가 가해질 때의 가속도는 피크 전류의 크기에 따라 변하며 용적의 형상 변화에 따라 대체적으로 일정하며 따라서 등가속도 운동으로 가정할 수 있다. 베이스 전류 구간에서 형성된 주어진 부피의 용융부에 대하여 피크 전류 하에서의 가속도는 액적의 이탈 시간을 결정하는 파라미터로 활용될 수 있으며 정적 힘 평형 이론의 z 방향의 전자기력만을 고려해도 VOF 방법을 사용한 수치해석 수준의 정확도를 얻을 수 있는 것으로 판단된다.

## References

- 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 최상균, 유중돈, 김용석 : GMAW의 동적 해석 Part 1 : 입상 용적 및 스프레이모드, 대한용접학회지, 15(3), 1997, 168-178
- 5 최상균, 유중돈, 박상규 : Pulsed-GMAW의 금속 이행에 관한 동적 해석, 대한용접학회지, 15(5), (1997) 458-465
- 6 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)
- 7 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