

# Pulsed-GMAW의 금속 이행 현상에 관한 동적 해석

## Dynamic Analysis of Metal Transfer in Pulsed-GMAW

최상균\*, 유중돈\*, 박상규\*\*

\* 한국과학기술원, 기계공학과,

\*\* 현대정공 기술연구소, 응용기술연구부

### 1. 서론

Pulsed-GMAW는 펄스(pulse)형태의 용접 전류를 이용하여 펄스를 가할 때마다 하나의 용적이 모재에 이행되도록 함으로서, 직류 전류에 비하여 모재에 가해지는 열 입력을 작게 하고, 규칙적인 금속 이행을 얻는 방법이다. Pulsed-GMAW에 관련된 기존의 해석 방법은 정적인 해석이므로 펄스 전류 변화에 따른 금속 이행의 동적 해석 방법이 요구된다. 최근 Volume of Fluid (VOF) 방법을 이용한 입상 용적 및 스프레이 모드의 동적 해석에 관한 연구가 수행되었으며, 실험 결과와 비교적 일치하는 결과를 얻었다<sup>1)</sup>. 본 연구는 VOF법을 이용하여 pulsed-GMAW의 금속 이행에 관한 해석을 수행하고, 용접 조건을 결정하는데 활용하고자 하였다. 자유 표면의 형상과 속도 분포를 수치적으로 계산하고, 용접 조건이 용적의 이탈에 미치는 영향을 해석하였다. 계산 결과는 가용한 실험 결과<sup>2)</sup>와 펄스 주파수의 허용 범위를 통하여 비교하였다.

### 2. Pulsed-GMAW의 특성과 초기 및 경계 조건.

본 연구에서는 피크와 베이스 전류의 지속 시간과 함께 아래와 같이 정의된 펄스 주파수와 duty cycle을 사용하였다.

$$f_p = 1/(T_p + T_b) \quad (1)$$

$$D_p = T_p/(T_p + T_b) \quad (2)$$

이 때,  $f_p$ 는 펄스 주파수,  $T$ 는 용접 시간,  $D$ 는 duty cycle, 첨자인  $p$ 와  $b$ 는 피크와 베이스를 나타낸다. 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) 펄스 전류는 이상적인 사각형 파형이다. (5) Drag에 의한 영향은 무시한다. 선형 전류 밀도 가정은 금속 이행을 상당히 정확하게 예측하였고<sup>1)</sup>, Nemchinsky<sup>3)</sup>의 선형 전류 가정보다 물리적으로 타당한 것으로 판단된다. 본 연구는 열 해석을 포함하고 있지 않으므로 실험적으로 측정된

평균 용융율을 용접봉 송급 속도로 사용하여 용접봉의 용융을 간접적으로 고려하였다.

### 3. 결과 및 고찰

직경 1.6mm 인 강 용접봉에 대하여 계산을 수행하였으며, 계산에 사용된 재질 및 상수는 기존 연구<sup>1)</sup>의 것을 이용하였다. 수치 계산의 해석 영역은 반경과 직경 방향으로 각각 3mm 와 10mm 이며, 길이가 0.1mm 인 정사각형 셀(cell) 을 사용하였다.

수치적으로 구한 용적의 자유 표면 형상과 펄스 파형 및 용적 내부의 최대 속도를 Fig.1 에 나타내었다. Base current 와 peak current 는 각각 180A 와 400A, 펄스 주파수와 duty cycle 은 20Hz 와 10%로 매 주기마다 일정한 시간에 용적이 이탈되며, 이탈된 액적의 평균 지름은 2.04mm 이다. 용적은 피크 전류 구간이 종료되고 대략 0.5ms 경과 후 이탈하고, 베이스 전류 구간의 190ms 에서 최대 유속은 0.28m/s 이며 피크 전류 구간에서 최대 유속은 2.64m/s 로 증가한다.

베이스와 피크 전류 구간 및 용적 이탈 직전의 용적 내부의 속도를 계산하여 Fig.2 에 나타내었다. 계산에 사용된 조건은 Fig.1 의 조건과 동일하다. 베이스 전류 구간에서 용융 금속은 Fig.2a 에 나타난 바와 같이 반시계 방향으로 회전하며, 최대 속도는 0.28 m/s 이다. 이와 같은 저속의 회전 유동은 피크 전류가 가해지면 축 방향 유동으로 변화하게 되며, 피크 전류 구간 후기에는 Fig.2b 에 나타난 바와 같이 축 방향의 유동이 지배적이며 최대 유속은 2.64m/s 로 증가한다. 용적이 이탈되기 직전의 속도 분포는 Fig.2c 와 같으며, 최대 유속은 2.77m/s 에 달한다. 넥킹부를 기준으로 용적 위부분은 시계방향으로 회전하고 아래 부분은 축 방향으로 유동한다.

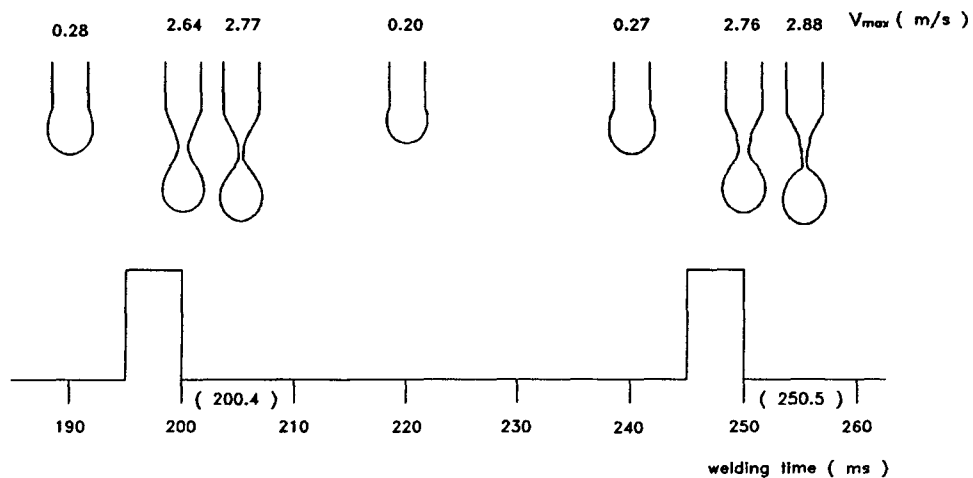


Fig.1 Calculated free surface profiles with pulsed current

( $f_p = 20$  Hz,  $D_p = 10$  %,  $I_b = 180$ A,  $I_p = 400$  A)

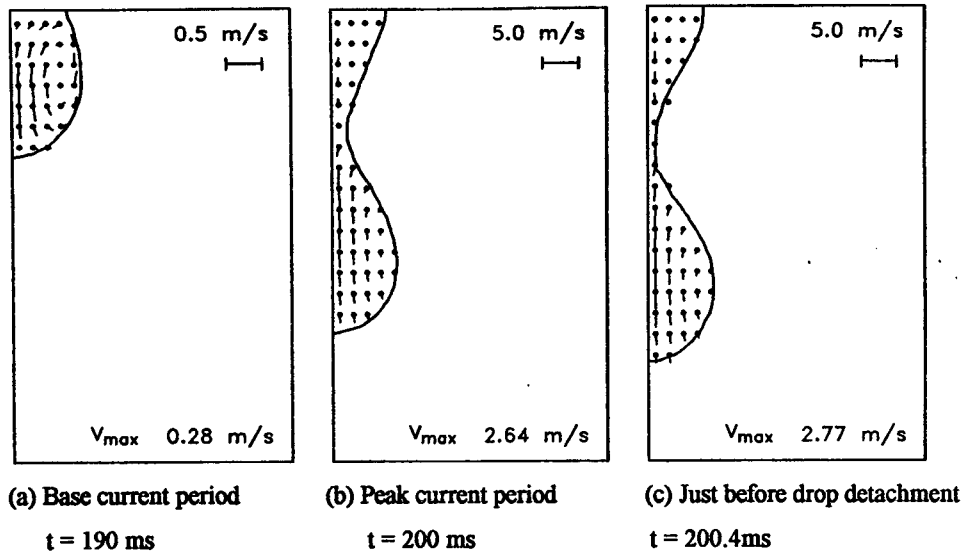


Fig.2 Velocity distributions within molten drop

Pulsed-GMAW의 용접 조건이 Fig.1과 동일한 경우(  $I_p=400A$ ,  $I_b=180A$ ,  $D_p=10\%$ ,  $f_p=20Hz$  ), 펄스 전류에 따른 용적의 무게 중심의 변위를 펄스 전류의 형상과 함께 Fig.3에 나타내었다. 피크 전류가 가해지면 변위가 급속히 증가하여 피크 전류 구간이 종료된 직후에 용적이 이탈하며, 용적이 이탈한 후 베이스 전류 구간에서 변위는 점진적으로 증가한다. 용적 내부의 속도도 이와 유사하게 변화한다. 그러므로 베이스 전류 구간에 비하여 피크 전류 구간이 용적의 이탈에 큰 영향을 미친다. Pulsed-GMAW에서 매 펄스 전류마다 하나의 용적

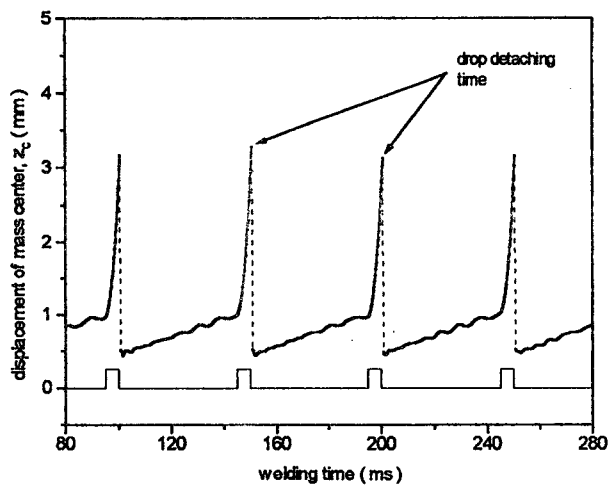


Fig. 3 Displacement and average axial velocity of pendent drop

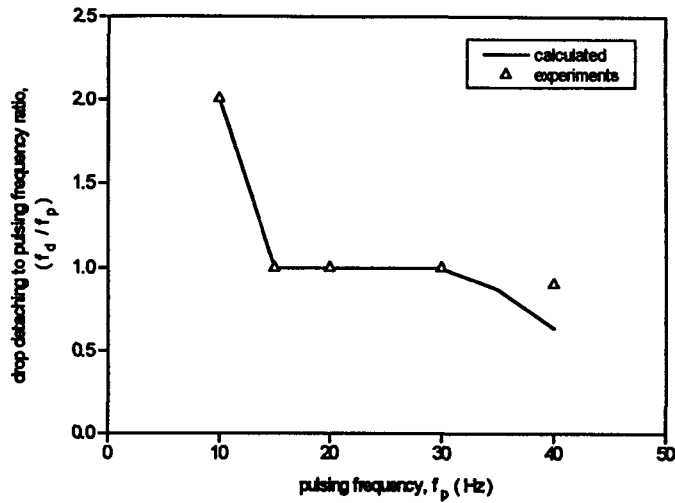


Fig.4 Comparison of operating range of pulsing frequency

이 이탈하려면, 그림에서 나타난 바와 같이 용적의 변위와 속도는 규칙적인 패턴으로 발생해야 하며, 용적의 이탈은 피크 전류 구간에서 결정됨을 알 수 있다.

Duty cycle 이 고정된 경우, 높은 주파수를 사용하면 피크 전류 시간이 짧아지므로 용적의 이탈에 필요한 속도와 가속도를 얻지 못한다. 이와 반대로 허용 범위보다 낮은 주파수를 사용하면 피크 전류 시간이 과다하게 길어져서 피크 전류 구간에서 다수의 용적이 이행한다. Base current 가 180A, peak current 가 400A 이고 duty cycle 이 10% 일 때, 매 펄스마다 하나의 용적이 이탈하는 펄스 주파수의 허용 범위를 계산하여 Fig.4 에 나타내었다. 용적 이탈 주파수와 펄스 주파수의 비 ( $f_d / f_p$ ) 가 1 이 되는 허용 범위를 구하였고, 고속 촬영 기법을 사용하여 측정된 용적 이탈 시간의 실험 결과와 비교하였다<sup>2)</sup>. 계산에 의한 허용 범위의 상한 값과 하한 값은 15Hz 와 30Hz 로 실험 결과와 비교적 일치한다. 수치 계산과 실험에서 발생할 수 있는 오차를 고려할 때, 본 연구에서 제안한 동적 해석을 통하여 계산된 허용 범위는 실험 결과와 비교적 정확하게 일치한다. 펄스 주파수는 허용 범위의 중간 값 근처에서 용접 속도를 고려하여 결정하고, 가급적 낮은 duty cycle 을 이용하여 열 입력을 낮추는 것이 바람직하다.

#### 4. 결론

Pulsed-GMAW 에서 발생하는 금속 이행의 동적 특성을 전자기력을 고려한 VOF 방법을 이용하여 수치적으로 해석하였다. Pulsed-GMAW 의 금속 이행은 피크 전류 구간에서 용적 이탈에 필요한 관성력을 얻기 위하여 높은 축 방향의 속도와 가속도가 요구되며, 이를 발생시키기 위하여 충분한 피크 전류와 지속 시간이 필요하다. 적절한 용접 조건을 선정하면 용적은 규칙적으로 피크 전류 구간이 종료된 직후에 이탈하며, 허용 범위를 벗어난 값을

사용하면 금속 이행이 불규칙적으로 발생하여 균일한 용접 품질을 얻기 어렵다. Duty cycle 과 피크나 베이스 전류를 증가시키면 피크 전류 시간이 짧아지더라도 용적의 이탈에 필요한 속도와 가속도를 얻을 수 있으므로 펄스 주파수를 증가시킬 수 있고 허용 범위도 커지게 된다. 계산 결과로 구한 펄스 주파수의 허용 범위는 실험값과 비교적 잘 일치하였다.

#### References

1. 최상균, 유중돈, 김용석 : VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석 (I) -입상 용적 및 스프레이 모드, 대한용접학회지 제출, 1997
2. Y.-S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D. Thesis, MIT, 1989
3. V.A. Nemchinsky : Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode, J. Phys. D: Appl. Phys. Vol.27, 1994, pp 1433-42
4. J.F. Lancaster : The physics of welding, Pergamon Press, 1985
5. S. Ueguri, K. Hara and H. Komura : Study of metal transfer in pulsed GMA welding, Welding Journal, Vol.64, 1985, pp.242s-250s