

研究論文

Pulsed-GMAW의 금속 이행 현상에 관한 동적 해석

최상균* · 유중돈** · 박상규***

Dynamic Analysis of Metal Transfer in Pulsed-GMAW

S. K. Choi*, C. D. Yoo** and S. G. Park***

Key Words : Pulsed-GMAW, Metal Transfer, VOF Method, Pulse Current, Inertia Force, Operating Range

Abstract

The metal transfer phenomenon of the pulsed-GMAW is simulated by formulating the electromagnetic force incorporated with the Volume of Fluid algorithm. The free surface profiles, pressure and velocity distributions within the drop are computed numerically. Axial velocity and acceleration generated during peak current period are found to have a significant effect on drop detachment. Therefore, the accelerated inertia force becomes one of important factors affecting metal transfer in the pulsed-GMAW. When the pulse current parameters are selected properly, the molten drop is detached just after current pulse, and the operating range of the pulsing frequency increases with higher peak current and duty cycle. Calculated operating ranges show reasonably good agreements with the available experimental data.

1. 서 론

Pulsed-GMAW는 펄스(pulse) 형태의 용접전류를 이용하여 펄스 전류를 가할 때 마다 하나의 용적이 용접봉으로부터 모재에 이행이 되도록 함으

로서, 금속이행(metal transfer)을 제어한다. 펄스 전류를 사용하므로 직류 전류에 비하여 모재에 가해지는 입열량이 작고 주기적인 금속이행으로 인하여 용접부의 질을 향상시킬 수 있으므로 향후 널리 사용될 것으로 예상된다. Pulsed-GMAW에서 모재로 이행되는 용적의 크기는 용접봉의 직경과

※ 1997년 4월 14일 접수

* 학생회원, 한국과학기술원 기계공학과

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

*** 비회원, 현대 정공 기술연구소 응용기술연구부

유사하며, 용적이 피크 전류 시간(peak current period) 중이거나 또는 그 직후에 이행하는 것으로 관찰되었다^{1,4)}. Pulsed-GMAW의 용접 조건은 고속 카메라 등을 이용한 실험을 통하여 결정하므로 고가의 측정 장비가 필요하다.

Pulsed-GMAW의 특성을 해석하기 위하여 기존의 금속이행 해석 모델과 용접부의 용융을 위한 에너지 보전식을 이용하였다^{1,2)}. 금속이행 현상을 해석하기 위하여 일반적으로 힘평형 모델과 pinch instability 이론을 사용하지만^{5,6)}, pulsed-GMAW의 금속이행 해석에 힘평형 모델이 적용되었다. 이는 힘평형 모델의 적용은 일반적으로 입상용적(globular) 모드에 한정되어 있지만, 축대칭인 임의의 형상에 대한 해석이 가능하고 용적 이탈 현상이 스프레이 모드의 초기인 projected 모드와 유사하므로 힘평형 모델을 사용하여 어느 정도 예측이 가능하기 때문이다. 그러나 펄스 전류는 입상용적과 스프레이(spray) 모드의 전류 범위에서 변화하기 때문에 힘평형 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. 최근 Volume of Fluid (VOF) 방법을 이용한 입상용적과 스프레이 모드의 동적 해석에 관한 연구가 수행되었으며, 실험 결과와 비교적 일치하는 결과를 얻었다⁷⁾.

본 연구는 동적 해석 방법을 이용하여 pulsed-GMAW의 금속이행에 관한 해석을 수행하고, 용접 조건을 결정하는데 활용하고자 하였다. 자유 표면의 형상과 속도 분포를 수치적으로 계산하고, 용접조건이 용적의 이탈에 미치는 영향을 해석하였다. 계산 결과는 가용한 실험결과¹⁾와 펄스 주파수(pulsing frequency)의 허용범위를 통하여 비교하였다.

2. Pulsed-GMAW의 특성과 초기 및 경계 조건

펄스 전류는 Fig. 1과 같이 피크와 베이스 전류의 크기 및 지속 시간으로 나타낼 수 있다. 본 연구에서는 피크와 베이스 전류의 지속 시간과 함께 아래

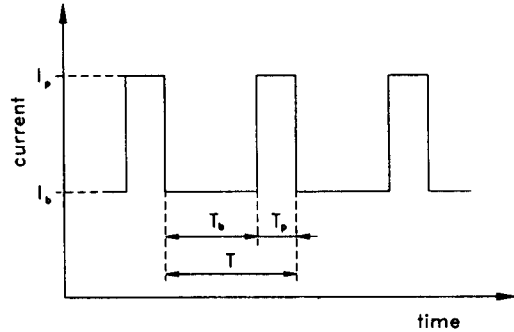


Fig.1 Parameters of pulse current waveform

와 같이 정의된 펄스 주파수와 load duty cycle을 사용하였다.

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

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

이때, f_p 는 펄스 주파수, T 는 용접 시간, D 는 load duty cycle, 첨자인 p와 b는 피크와 베이스를 나타낸다. 입열량과 관련이 있는 평균 전류는 다음과 같다.

$$I_{avg} = (I_p T_p + I_b T_b) / (T_p + T_b) = I_p D_p + I_b (1 - D_p) \quad (3)$$

위의 식(3)에서 load duty cycle이 일정하면, 펄스 주파수가 변화하더라도 평균 전류값은 일정하다.

일반적으로 pulsed-GMAW에서 피크 전류는 천이 전류보다 상당히 높으며 베이스 전류는 천이 전류보다 낮다. 피크와 베이스 전류값이 선정되면 load duty cycle은 용접봉과 모재에 가해지는 입열량을 고려하여 결정되며, 펄스 주파수는 매 펄스마다 용적이 이탈되도록 선정하여야 한다. 고속 촬영 기법을 이용하여 금속이행 현상을 관찰한 결과, 피크 전류 시간은 일정한 시간 이상이어야 매 펄스마다 용적이 이탈하는 것으로 밝혀졌다³⁾. 그러나 실험을 통하여 pulsed-GMAW의 동적 특성을 정량적으로 해석하는 것은 쉽지 않다.

본 연구에서 사용한 전자기력을 포함한 VOF 기법은 기존의 연구⁷⁾와 동일하므로 생략하고, pulsed-GMAW의 해석을 위한 가정과 Fig. 2에 나

타난 초기 및 경계조건에 관하여 설명한다. 수치 해석을 위하여 사용한 가정은 다음과 같다. (1) 용융 금속은 비압축성 유체이며, 물성치는 온도와 무관하게 일정하다. (2) 용적 표면의 전류 밀도는 축방향을 따라 선형적으로 증가한다. (3) 용접봉의 송급 속도는 주어진 용접 조건에서 일정하다. (4) 펄스 전류는 Fig. 1에서 보인 바와 같이 이상적인 사각형 파형이다. (5) Drag에 의한 영향은 무시한다. 위의 가정 중에서 선형 전류 밀도 가정은 용적의 밑부분에서 높은 아크 온도로 인하여 전류 밀도가 윗부분보다 상대적으로 높아지는 것을 의미한다. 표면에서 방출되는 전류밀도가 z축에 선형적으로 증가하는 경우, 표면의 전류 밀도는 다음과 같은 식으로 표현된다⁷⁾.

$$J_{sj} = \frac{Iz_j}{\sum_{surface} (S_{i,j}z_j)} \quad (4)$$

이 때, J_s 는 자유 표면에서의 전류 밀도, S는 해당 셀의 표면적을 나타낸다. 이와 같은 가정은 금속이 행을 상당히 정확하게 예측하였고⁷⁾, Nemchinsky⁸⁾의 선형 전류 가정보다 물리적으로 타당한 것으로 판단된다. Pulsed-GMAW에서 피크 전류 구간에 응용되는 양은 베이스 전류 구간에 비하여 증가한다. 본 연구는 열해석을 포함하고 있지 않으므로 실험적으로 측정된 평균 용융 속도를 용접봉 송급 속도로 사용하여 용접봉의 용융을 간접적으로 고려하였다.

초기 조건으로 Fig. 2에 나타난 바와 같이 용적 내부의 초기 속도는 용접봉 송급 속도로 주어지며, z 축을 따라 free-slip 조건을, 용적과 고체 상태의 용접봉의 경계에서 용접봉의 송급속도를 부가하였다. 펄스 주파수에 따라 피크와 베이스 전류 구간에서 용적 표면의 전류 밀도가 계산되어 경계 조건으로 주어지면 용적 내부의 전압과 전류 분포를 계산하고, 전자기력을 구하였다. 전자기력은 체적력으로 지배 방정식에 포함되며, 용적의 자유 표면과 속도, 압력을 수치적으로 계산하였다.

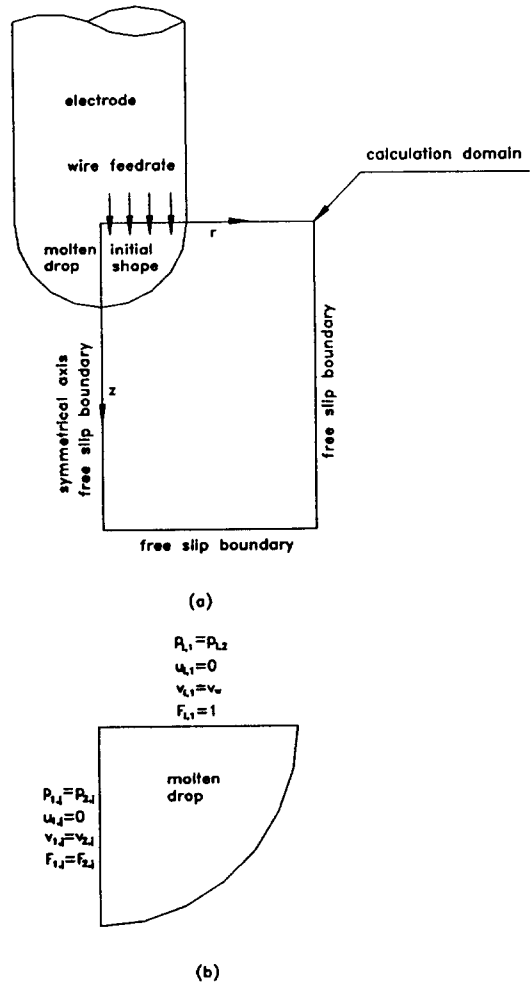


Fig. 2. Pendant drop configuration with initial and boundary conditions
 (a) Initial shape and solution domain
 (b) Conditions for velocity and pressure

3. 결과 및 고찰

직경 1.6mm인 강 용접봉에 대하여 계산을 수행하였으며, 계산에 사용된 재질 및 상수는 Table 1에 나타내었다⁹⁾. 계산에 사용된 물성치 중에서 금속이행에 큰 영향을 미치는 표면장력 계수를 1.8N/m 로 설정하였다. 이는 pulsed-GMAW의 평균 전류가 일반적으로 천이 전류 이하이므로 용적 표

면의 온도가 상대적으로 낮기 때문에 높은 표면장력 계수를 계산에 사용하였다. 수치 계산의 해석 영역은 반경과 직경 방향으로 각각 3mm와 10mm이며, 길이가 0.1mm인 정사각형 셀(cell)을 사용하였다.

Table 1. Material properties

Mass density, ρ	7860 (kg/m ³)
Kinematic viscosity, ν	2.8×10^{-7} (m ² /s)
Surface tension coefficient, γ	1.8 (N/m)
Electrical conductivity, σ	8.54×10^5 (mho/m)
Permeability, μ	$4 \pi \times 10^{-7}$ (H/m)

3.1 용적의 형상 및 속도 분포

용접봉 송급 속도가 45mm/s (=0.71g/s), 베이스와 피크 전류가 각각 180A와 400A 인 경우에 대하여 시간에 따라 변화하는 용적의 형상을 계산하였다. 계산에 사용된 load duty cycle은 5와 10%이며, 각 경우에 해당하는 펄스 주파수는 10Hz와 20Hz로서 이와 같은 조건에서 매 펄스마다 용적이 이탈되는 것이 실험에서 관찰되었다¹⁾. 직경 1.6mm 인 강용접봉의 천이 전류는 대략 275A 이므로^{4,8)}, 펄스 전류는 입상용적과 스프레이 이행 구간에 걸쳐 변화하며 load duty cycle이 5%와 10%인 경우에 평균 전류는 각각 191A와 202A 로서 천이 전류보다 낮다.

수치적으로 구한 용적의 자유 표면 형상과 펄스 파형 및 용적 내부의 최대 속도를 Fig. 3에 나타내었으며, 매 펄스마다 하나의 용적이 피크 전류 구간 직후에 이탈됨을 알 수 있다. Load duty cycle이 5% 이고 펄스 주파수가 10Hz인 경우 (Fig. 3a), 구의 지름으로 환산한 이탈하는 용적의 평균 지름은 2.58mm이다. 용적이 이탈한 후 베이스 전류 구간에서 용적은 구형과 유사한 형상을 이루며, 용적 내부의 최대 유속은 190ms에서 0.38m/s 이다. 피크 전류 구간에서 용적의 윗부분에 넥킹(necking)이 시작되고 높은 전자기력으로 인하여 유속이 1.8m/s 로 증가하지만, 용적의 이탈은 발생하지 않는다. 피크 전류 구간이 끝나고 베이스 전류 구간이 시작되면 180A의 저전류임에도 불구하고 유속이 증가하고 용적은 베이스 전류 구간에서 약 1ms

경과하면 이탈한다. 용적 이탈 직전의 최대 유속은 1.88m/s로 증가하며, 이는 베이스 전류 구간 초기에 전류가 감소하더라도 피크 전류 구간에서 발생한 가속도로 인하여 유속이 증가한다. 그러므로 pulsed-GMAW의 금속이행에서 피크 전류 구간에서 발생한 가속된 관성력은 용적의 이탈에 매우 중요한 역할을 하며, 용적을 이탈시키기 위하여 피크 전류 구간에서 충분한 속도와 가속도가 용적 내부에서 발생하여야 한다. 용적이 이탈하면, 용융부는 반구의 형상으로 되며 속도는 감소된다.

펄스 주파수와 load duty cycle을 20 Hz와 10%로 증가시킨 경우의 계산 결과를 Fig. 3b에 나타내었으며, Fig. 3a와 비교하여 베이스 전류 구간은 감소하지만 피크 전류 시간은 5ms로 동일하다. 매 주기마다 일정한 시간에 용적이 이탈되며, 높은 펄스 주파수로 인하여 5% load duty cycle의 경우보다 용적의 부피는 작아지고 이탈된 용적의 평균 지름은 2.04mm 이다. 용적의 형상 변화에 대한 패턴은 Fig. 3a의 5% load duty cycle인 경우와 유사하며, 용적은 피크 전류 구간이 종료되고 0.5ms 경

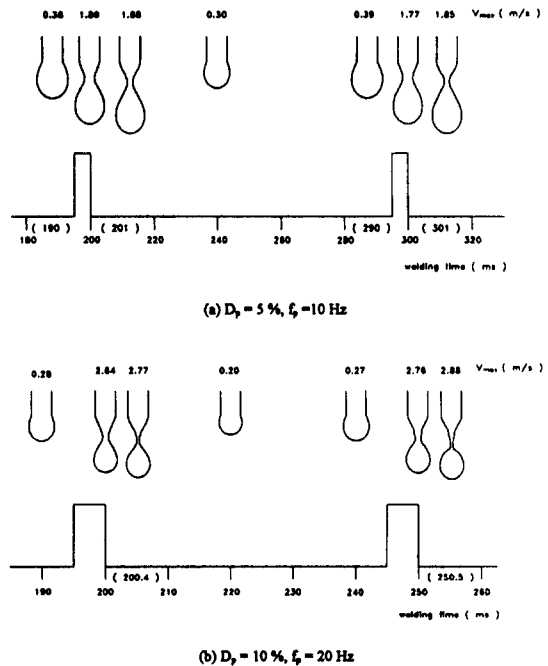


Fig 3. Calculated free surface profiles with pulsed current ($I_p = 400\text{A}$, $I_b = 180\text{A}$)

과 후 이탈한다. 베이스 전류 구간의 190ms에서 최대 유속은 0.28m/s로서 5% load duty cycle의 경우보다 작게 되며, 이는 베이스 전류 시간이 짧기 때문이다. 피크 전류 구간에서 최대 유속은 2.64m/s로 증가하며 5% load duty cycle의 경우보다 크게 된다. 이는 피크 전류 시간은 동일하며 용적의 부피가 작으므로 용적에 작용하는 전류 밀도와 전자기력이 증가하기 때문이다.

Load duty cycle이 5%이고 펄스 주파수를 25Hz로 증가시킨 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3의 경우와 달리 용적을 이탈시키는 데 2개의 펄스가 필요하며, 용적의 이탈 시간은 일정하지 않다. 첫 번째 피크 전류 구간에서 반구형의 용적이 전자기력에 의하여 타원형으로 되지만 피크 전류 시간이 짧으므로 유속이 0.76m/s로 낮게 되어 이탈이 발생하지 못한다. 베이스 전류 구간에서 속도는 감소하지만 용적의 부피는 증가하여 용적은 구형으로 된다. 두 번째 피크 전류 구간에서 유속은 0.82m/s로 약간 증가하지만 Fig. 3의 경우와 비교하여 상당히 낮으므로 피크 전류 직후 이탈이 발생하지 못하고 입상용적 이행 모드와 유사하게 베이스 전류 구간에서 이탈이 발생한다. 그러므로 용적의 이탈 시간은 일정하지 않고 불규칙한 이탈로 인하여 용적의 부피나 유속 등도 불균일하게 되므로 균일한 용적품질을 얻기 어렵다.

베이스와 피크 전류 구간 및 용적 이탈 직전의 용적 내부의 속도를 계산하여 Fig. 5에 나타내었다. 계산에 사용된 조건은 Fig. 3b의 조건과 동일하다. 베이스 전류 구간에서 용융 금속은 Fig. 5a에 나타난 바와 같이 반시계 방향으로 회전하며, 최대 속도는 0.28 m/s 이다. 이와 같은 저속의 회전

유동은 피크 전류가 가해지면 축방향 유동으로 변화하게 되며, 피크 전류 구간 후기에는 Fig. 5b에 나타난 바와 같이 축방향의 유동이 지배적이며 최대 유속은 2.64m/s로 증가한다. 용적이 이탈되기 직전의 속도 분포는 Fig. 5c와 같으며, 최대 유속은 2.77m/s에 달한다. 넥킹부를 기준으로 용적 윗부분은 시계방향으로 회전하고 아래 부분은 축방향으로 유동한다.

Pulsed-GMAW의 용접조건이 Fig. 3b와 동일한 경우 ($I_p=400A$, $I_b=180A$, $D_p=10\%$, $f_p=20Hz$), 펄스 전류의 변화에 따른 용적의 무게 중심이 변화하는 변위를 펄스 전류의 형상과 함께 Fig. 6에 나타내었다. 무게 중심의 변위는 아래의 식을 이용하여 계산하였다.

$$z_c = \sum_i m_i z_i / M \tag{5}$$

이때, z_c 는 무게 중심의 축방향 변위, m_i 는 i 번째 셀의 무게, z_i 는 셀의 변위, M 은 전체 용적의 무게를 나타낸다. 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 용적이 이탈하려면, 그림에서 나타난 바와 같이 용적의 변위와 속도는 규칙적인 패턴으로 발생하여야 하며, 용적의 이탈은 피크 전류 구간에서 결정됨을 알 수 있다. 해석 결과로부터 기존의 금속이행의 해석에서 고려하는 표면장력, 중력, 전자기력 등의 힘 이외에 피크 전류에 의하여 발생한 속도와 가속도 및 이에 의한 용융 금속의 관성력이 용적의 이탈에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 또한, pulsed-GMAW의 금속이행은 수치적으로 해석이 가능하므로 규칙적으로 용적을 이탈시키는 용접조건을 수치 계산을 통하여 결정할 수 있다.

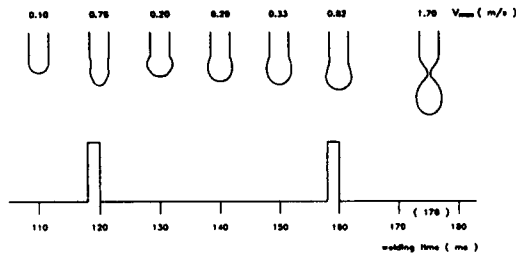
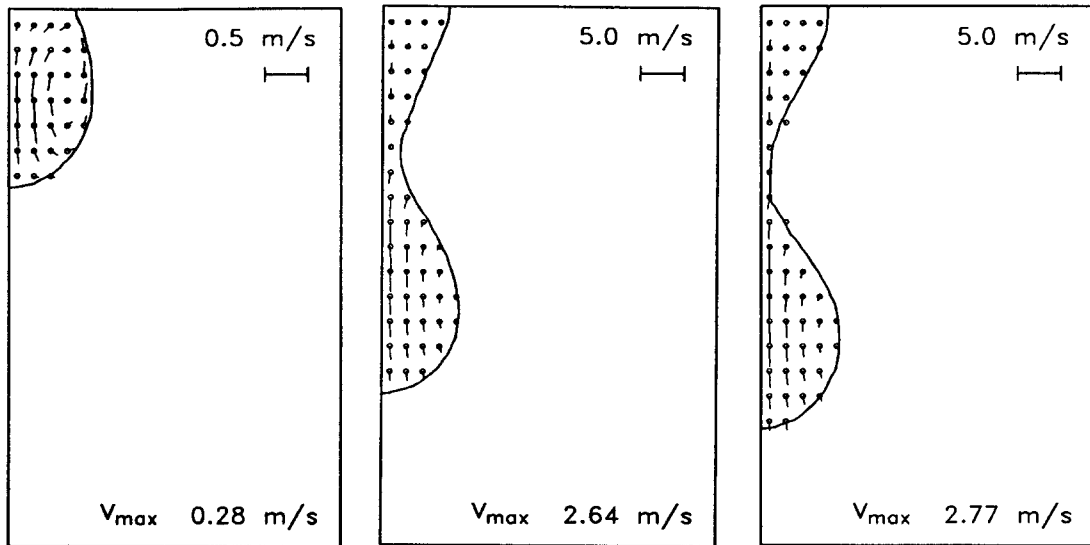


Fig. 4. Calculated free surface profiles with pulsed current ($I_p = 400A$, $I_b = 180A$, $D_p = 5\%$, $f_p = 25Hz$)

3.2 펄스 전류의 영향 및 허용 범위

Pulsed-GMAW 공정의 4가지 변수인 펄스 주파



(a) Base current period, $t=190\text{ms}$ (b) Peak current period, $t=200\text{ms}$ (c) Just before drop detachment, $t=200.4\text{ms}$

Fig 5. Velocity distributions within molten drop ($I_p=400\text{A}$, $I_b=180\text{A}$, $D_p=10\%$, $f_p=20\text{Hz}$)

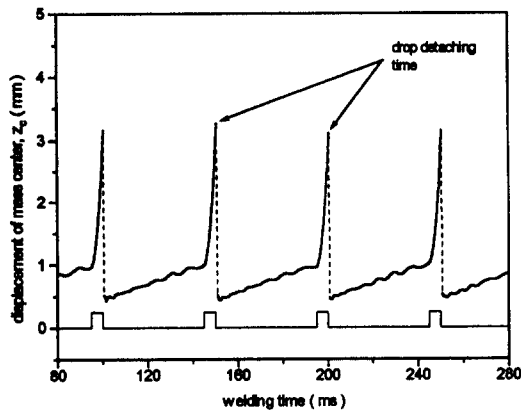


Fig 6. Variation of mass center displacement ($I_p=400\text{A}$, $I_b=180\text{A}$, $D_p=10\%$, $f_p=20\text{Hz}$)

수, load duty cycle, 베이스와 피크 전류는 서로 연관을 가지고 금속이행에 영향을 미친다. 일반적으로 load duty cycle, 베이스와 피크 전류가 입열량과 용접봉의 용융 등을 고려하여 선정되면, 펄스 주파수는 매 펄스마다 하나의 용적이 이탈하도록 허용 범위 내에서 결정되어야 한다. Load duty

cycle이 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 과도하게 길어져서 피크 전류 구간에서 다수의 용적이 이행한다.

금속이행에 중요한 인자인 피크 전류 시간은 펄스 주파수 뿐만 아니라 load duty cycle에도 영향을 받는다. Load duty cycle이 증가하면 피크 전류 시간이 길어지므로 펄스 주파수를 증가시킬 수 있지만, 이와 같은 경우에 평균 전류도 증가하므로 입열량이 증가한다. 펄스 전류는 입열량과 전자기력에 영향을 미치며, 피크 전류의 크기에 따라 용적의 이탈에 요구되는 속도와 가속도가 결정되므로 Fig.6에 나타난 바와 같이 피크 전류의 영향은 베이스 전류보다 크다. 피크 전류를 증가시키면, 용적 내의 전자기력과 유속이 증가하므로 피크 전류 시간이 짧더라도 용적의 이탈에 필요한 속도와 가속도를 얻을 수 있기 때문에 펄스 주파수를 증가시킬 수 있다. 베이스 전류를 증가시키면 베이스 전류 구간에서 용융 금속의 속도와 가속도를 증가시키므로 전반적인 속도와 가속도가 증가하며 펄스 주파수를

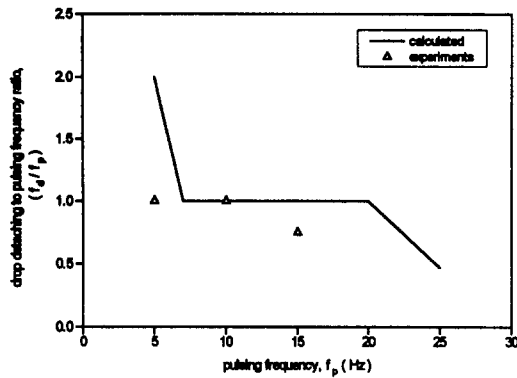
증가시킬 수 있다. 그러나 베이스 전류의 크기가 천이 전류에 근접하지 않으면 용적의 이탈 주파수에 큰 영향을 미치지 못하므로¹⁾, 베이스 전류는 다른 변수에 비하여 상대적으로 중요성이 낮다.

베이스 전류가 180A 이고 피크 전류가 400A와 500A 인 경우에 대하여 매 펄스마다 하나의 용적이 이탈하는 펄스 주파수의 허용 범위 (operating range) 를 계산하여 Fig. 7과 8에 나타내었다. 용적 이탈 주파수와 펄스 주파수의 비 (f_d/f_p) 가 1이 되는 허용 범위를 구하였고, 고속 촬영 기법을 사용하여 측정 한 용적 이탈 시간의 실험 결과와 비교하였다²⁾.

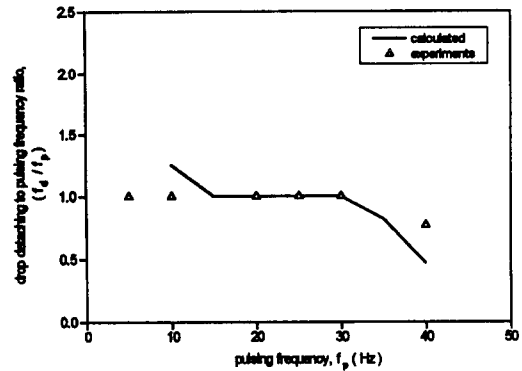
Load duty cycle이 5%인 경우 (Fig. 7a), 10Hz 이하의 펄스 주파수 범위에서는 피크 전류 시간이 과도하게 증가하여 한 펄스 주기에 여러 개의 용적이 이탈한다. 펄스 주파수를 증가시키면 계산된 용적

이탈 주파수는 펄스 주파수와 동일하게 되며, 7Hz와 20Hz 구간의 허용 범위를 갖게 된다. 계산에 의한 허용 범위는 실험에 의해 측정된 허용 범위의 상한값과 하한값인 5Hz와 10Hz보다 높다. 허용 범위 이상으로 펄스 주파수를 증가시키면, 피크 전류 시간이 감소하여 펄스 주파수가 용적 이탈 주파수보다 증가한다. Load duty cycle이 10%로 증가하면 (Fig. 7b), 계산에 의한 허용 범위의 상한값과 하한값은 15Hz와 30Hz로 증가한다. Load duty cycle이 5%인 경우와 비교하여 피크 전류 시간이 증가하므로 허용 범위는 커지며, 실험 결과와 일치한다.

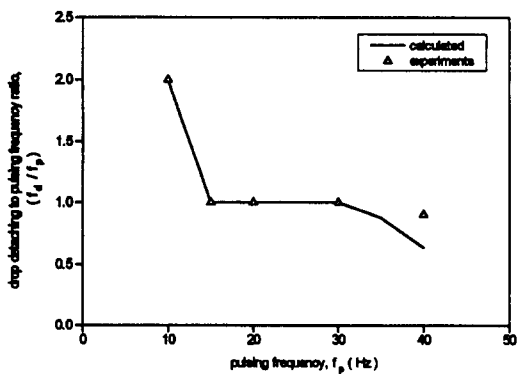
피크 전류를 500A로 증가시킨 경우의 허용 범위를 Fig. 8에 나타내었다. Load duty cycle이 5%인 경우 (Fig. 8a), 계산에 의한 허용 범위의 상한값과



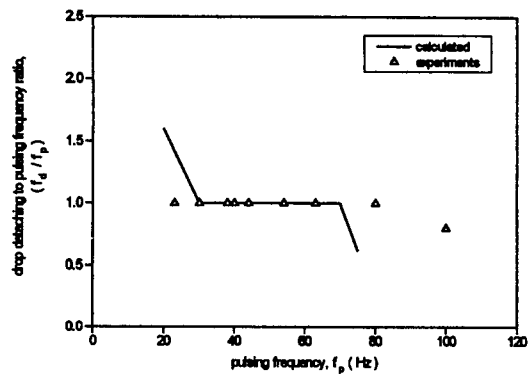
(a) $D_p = 5\%$



(a) $D_p = 5\%$



(b) $D_p = 10\%$



(b) $D_p = 10\%$

Fig 7. Comparison of operating range of pulsing frequency ($I_p=400A$, $I_b=180A$)

Fig 8. Comparison of operating range of pulsing frequency ($I_p=500A$, $I_b=180A$)

하한값은 15Hz와 30Hz이다. 피크 전류가 400A인 Fig. 7a의 경우와 비교하여, 피크 전류가 증가하여 피크 전류 시간이 짧더라도 이탈에 필요한 속도와 가속도를 얻을 수 있으므로 허용 범위가 증가한다. 피크 전류가 400A인 경우보다 실험 결과와 잘 일치하며, 이는 피크 전류가 500A로 증가하였기 때문에 계산과 실험으로 구한 허용 범위가 증가하기 때문인 것으로 추정된다. Load duty cycle을 10%로 증가시키면 (Fig. 8b), 계산에 의한 허용 범위의 상한값과 하한값은 30Hz와 70Hz로 증가한다. Load duty cycle이 5%인 경우보다 실험 결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

계산 결과와 실험값의 차이는 본 연구에서 용접봉의 송급속도와 물성치를 일정하다고 가정하였고 용융부 표면의 진류분포를 가정하였으며, Drag에 의한 영향 및 실제 용접기의 응답성을 고려하지 않았기 때문인 것으로 추정된다. 그러나 수치 계산과 실험에서 발생할 수 있는 오차를 고려할 때, 본 연구에서 제안한 동적 해석을 통하여 계산된 허용 범위는 실험 결과와 비교적 정확하게 일치한다. 이와 같은 오차를 고려하여 펄스 주파수는 허용 범위의 중간값 근처에서 용접속도를 고려하여 결정하고, 가급적 낮은 load duty cycle을 이용하여 입열량을 낮추는 것이 바람직하다.

4. 결 론

Pulsed-GMAW에서 발생하는 금속이행의 동적 특성을 전자기력을 고려한 VOF 방법을 이용하여 수치적으로 해석하였다. Pulsed-GMAW의 금속이행은 피크 전류 구간에서 용적 이탈에 필요한 관성력을 얻기 위하여 높은 축방향의 속도와 가속도가 요구되며, 이를 발생시키기 위하여 충분한 피크 전류와 지속 시간이 필요하다. 적절한 용접조건을 선정하면 용적은 규칙적으로 피크 전류 구간이 종료된 직후에 이탈하며, 허용 범위를 벗어난 값을 사용하면 금속이행이 불규칙적으로 발생하여 균일한 용접 품질을 얻기 어렵다. Load duty cycle과 피

크나 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 일치하였으며, pulsed-GMAW의 펄스 주파수를 수치 해석을 통하여 구할 수 있었다.

References

1. Y. -S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph. D. Thesis, MIT, (1989).
2. J. H. Waszink and M. J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, *Welding Journal*, Vol. 65 (1986), pp. 289s-298s
3. S. Ueguri, K. Hara and H. Komura : Study of metal transfer in pulsed GMA welding, *Welding Journal*, Vol. 64 (1985), pp. 242s-250s
4. J. 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.*, Vol. 16 (1965), pp. 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 change, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 18 (1985), pp. 1431-1446
7. 최상균, 유중돈, 김용석 : GMAW의 동적해석 Part1- 입상용적 및 스프레이 모드, *대한용접학회지*, Vol. 15, No. 3 (1997), PP. 168-178
8. 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. 1433-1442