

## 힘-변위 모델을 이용한 펄스 GMAW의 해석

Arif, Nabeel\* · 이재학\*\* · 유중돈\*†

\*KAIST, 기계공학과

\*\*한국기계연구원, 초정밀기계시스템실

### Analysis of Pulsed GMAW Using Force-Displacement Model

Arif, Nabeel\*, Lee, Jae Hak\*\* and Yoo, Choong Don\*†

\*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

\*\*Department of Ultra Precision Mechanics and Systems, KIMM, Daejeon 305-343, Korea

†Corresponding author : cdyoo@kaist.ac.kr

(Received July 17, 2008 ; Revised August 5, 2008 ; Accepted February 2, 2009)

#### Abstract

In order to determine the One-Drop One-Pulse (ODOP) condition of the pulsed gas metal arc (GMA) welding, the drop detaching phenomenon during the peak time is investigated using the force-displacement model. The drop detaching criterion is established based on the displacement of the pendant drop, and the forces exerted on the drop are calculated using the Modified Force Balance Model (MFBM). The effects of wire melting on the drop size and force are included in the force-displacement model. While the peak current has most significant effects on the drop detaching time, the initial drop mass prior to the peak time also influences drop transfer. The calculated results show good agreements with the experimental data, which implies that the ODOP condition can be predicted using the force-displacement method.

Key Words : Pulsed GMAW, Force-displacement model, ODOP, MFBM, Wire melting

#### 1. 서 론

펄스 GMA 용접(GMAW-P) 공정은 펄스 형태의 전류를 인가하여 각 펄스마다 하나의 용적이 이탈하는 특징이 있다. 이와 같은 GMAW-P의 ODOP(One-Drop One-Pulse) 특성을 이용하면 용적이행을 제어할 수 있고 열입력을 감소시킬 수 있다. 다양한 GMAW-P 공정의 장점에도 불구하고 ODOP가 발생하는 적절한 용접 조건(피크 전류와 시간 및 베이스 전류와 시간)을 구하는 것은 쉽지 않다<sup>1)</sup>. 부적절한 용접조건을 사용하는 경우에는 하나의 펄스에 다수의 용적이 이탈하는 MDOP(Multiple-Drops One-Pulse) 또는 다수의 펄스를 가해야 하나의 용적이 이탈하는 ODMP(One-Drop Multiple-Pulses)가 발생하며, 특히 ODMP 조건에서는 이탈 용적의 크기와 주기가 불균일하므로 GMAW-P의 장점을 얻을 수 없다.

GMAW-P에서 ODOP 조건을 결정하기 위하여 아래와 같은 피크 전류와 피크 시간의 함수로 표현한 실험식이 많이 사용되고 있다<sup>2)</sup>.

$$I_p^n t_p = C \quad (1)$$

이때,  $n$ 과  $C$ 는 실험으로 구하는 상수이며,  $n$ 의 범위는 1.5~2.5으로 알려져 있다. 피크 전류와 시간뿐만 아니라 베이스 전류와 시간을 포함한 실험식도 제안되었으나, 실험식에 포함된 상수가 많아 사용하기 어려운 단점이 있다<sup>3)</sup>.

용적 이탈을 예측하기 위한 해석적인 방법으로 Allum<sup>2)</sup>은 핀치 이론(Pinch Instability Theory, PIT)과 와이어 용융식으로부터 식(1)의 상수값  $n=1.556$ 을 구하였다. Kim<sup>1)</sup> 등은 정적 힘평형 모델(Static Force Balance Model, SFBM)을 이용하여 ODOP가 발생

하는 주파수 영역을 계산하고 실험 결과와 비교하였다. 최상균<sup>4)</sup> 등은 ODOP 조건을 예측하기 위하여 피크 구간에서 발생한 전자기력에 의해 용적이 이동하는 거리를 계산하여 용적의 이탈을 판정하였다. 그러나 용적의 크기가 고정되어 있고 이탈력으로 전자기력만 고려한 단점이 있다. 자유표면을 고려한 수치해석 방법을 이용하면 GMAW-P의 용적이탈 현상에 대한 자세한 정보를 얻을 수 있지만, ODOP 조건을 결정하려면 많은 계산 시간이 소요된다<sup>5)</sup>. 이외에도 피크 전류에 의해 매우 짧은 시간에 용적이 이탈한다고 가정하여 와이어 용융만을 고려한 열해석으로 ODOP 조건을 계산하였다<sup>6)</sup>.

본 연구에서는 GMAW-P에서 ODOP가 발생하는 조건을 힘-변위 모델(force-displacement model)을 이용하여 예측하였다. 용적에 가해지는 힘과 와이어 용융을 고려하였으며, 용적의 이탈 조건으로 용적의 변위를 사용하였다. 펄스 인자가 용적의 이탈에 미치는 영향을 분석하고 실험 결과와 비교하여 제안한 방법의 타당성을 검증하였다.

### 2. 힘-변위 모델

Fig. 1은 GMAW-P의 펄스 전류가 사각형 파형인 경우에 피크 구간에서 necking(necking)이 발생하여 용적이 이탈하는 과정을 나타낸다. 이상적인 ODOP 조건에서는 용적의 이탈 직후 피크 전류가 종료되지만, 실제의 경우에는 피크 시간 내에서 용적이 이탈한 후에도 피크 전류는 일정 시간 동안 지속된다. 그러므로 본 연구에서는 피크 시간을 용적 이탈시간과 추가 피크 시간으로 구분하였다.

$$t_p = t_{pd} + t_{pa} \tag{2}$$

이때,  $t_{pd}$ 와  $t_{pa}$ 는 각각 용적 이탈시간과 추가 피크 시간을 나타내며, 피크 시간 동안 와이어는 피크 전류에

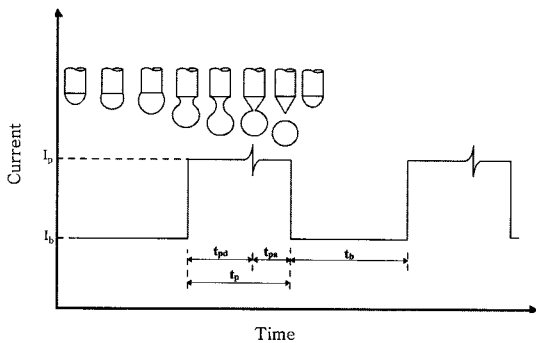


Fig. 1 Sequential change of configuration of pendant drop

의해 용융된다.

GMAW-P에서 피크 전류는 매우 높기 때문에 기존의 SFBM을 사용하면 피크 전류가 가해지는 순간 용적의 이탈력이 부착력보다 커져서 용적이 이탈하는 것으로 계산되지만, 실제로는 Fig. 1에 보인 바와 같이 피크 전류가 가해져도 용적이 이탈하는데 시간이 소요된다. 그러므로 GMAW-P의 용적 이행을 해석하려면 SFBM의 용적 이탈 조건과 다른 이탈 조건을 사용해야 한다. 기존의 수치해석 결과<sup>7)</sup>로부터 ODOP가 발생하는 경우에 피크 구간에서 용적의 신장 속도와 변위(elongation velocity and speed of pendant drop)가 급격히 증가하며, 피크 구간에서 용적의 속도와 변위가 한계값 이상으로 증가하면 용적이 이탈한다. 용적의 한계 이탈 속도를 정량적으로 결정하기 어렵기 때문에 이탈 조건으로 용적의 변위를 사용하는 것이 적합하며, 이는 기존의 연구와 유사하다<sup>4)</sup>. 본 연구의 용적의 이탈 조건은 Fig. 2에 보인 바와 같이 피크 전류에 의해 용적 중심의 변위가 한계값 이상으로 증가하면 necking이 발생하여 용적이 이탈한다고 설정하였다.

$$z \geq z_{cr} \tag{3}$$

변위의 한계값은 용적 이탈 후 와이어 끝에 잔류하는 용융부의 부피에 의해 결정되고 와이어에 잔류하는 용융부의 형상은 원추형이다. Allum<sup>2)</sup>은 용적의 이탈시 와이어 끝에 잔류하는 용융부의 부피는 전체 용적의 25% 정도로 추정하였고, 이는 최상균<sup>4)</sup> 등의 해석 결과와도 유사하다.

피크 구간에서 용적이 늘어나면서 necking이 발생하여 이탈하기 때문에 본 연구에서는 용적에 가해지는 힘을 계산하기 위하여 기존의 SFBM에 모멘텀(momentum)을 추가한 MFBM을 사용하였다<sup>7)</sup>. 이는 MFBM이 고전류 영역에서 용적의 이탈을 SFBM 보다 정확하게 예측하기 때문이다. 일반적으로 GMAW-P의 피크 전류

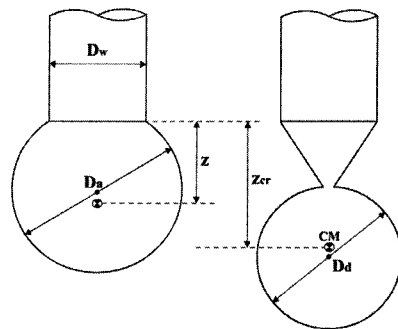


Fig. 2 Drop detaching criterion with displacement of mass center

가 천이 전류보다 매우 크고 용적의 직경이 와이어 직경과 유사하기 때문에 중력과 항력을 무시하면, 용적에 가해지는 힘을 표면장력과 전자기력 및 모멘텀으로 나타낼 수 있다<sup>7)</sup>.

$$\begin{aligned}
 F_a &= (F_{em} + F_{mf}) - F_\gamma \\
 &= (k_{em} + k_{mf}) I_p^2 - \pi D_w \gamma \\
 &= k I_p^2 - \pi D_w \gamma \\
 k_{em} &= \frac{\mu_o}{4\pi} \left( \ell \ln \frac{D_w \sin \theta}{D_a} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} \right. \\
 &\quad \left. + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{1 + \cos \theta} \right) \\
 k_{mf} &= \frac{\mu_o}{4\pi} \left( \left( \frac{D_w}{D_a} \right)^2 - \left( \frac{I_2}{I_p} \right)^2 \right)
 \end{aligned} \tag{4}$$

이때,  $F_{em}$ ,  $F_{mf}$ ,  $F_\gamma$  은 각각 전자기력, 모멘텀, 표면장력을 나타내며,  $D_w$  는 와이어 직경,  $D_a$  는 와이어에 부착된 용적의 직경,  $\gamma$ 는 표면장력,  $\theta$ 는 아크가 덮인 용적의 표면적을 나타내는 아크 각도,  $I_2$  는 용적의 하단부에 흐르는 전류를 나타낸다<sup>7)</sup>.

피크 구간에서 용적에 가해지는 힘에 의해 용적이 가속되며, 용적의 가속도는 용적의 질량과 가속력으로 나타낼 수 있다.

$$a = \frac{F_a(t)}{m(t)} \tag{5}$$

피크 시간에서 용적이 이탈하기 전까지 와이어가 용융하여 용적의 질량이 증가하며, 용적 이탈 구간에서 용적의 질량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(t) &= \dot{m}_p t + (\dot{m}_p t_{pa} + m_r + m_b) \\
 &= \dot{m}_p t + m_i \quad \text{for } 0 < t < t_{pd}
 \end{aligned} \tag{6}$$

이때,  $m_r$  은 용적 이탈시 와이어에 잔류하는 양,  $m_b$ 는 베이스 구간에서의 용융량,  $m_i$  는 피크 구간이 시작하기 직전에 와이어에 부착된 용적의 초기 질량을 나타낸다. 아크열과 저항열에 의한 와이어 용융량은 다음과 같다.

$$\dot{m} = \rho A_w v_m \quad \text{and} \quad v_m = a I + b L_e I^2 \tag{7}$$

이때,  $\rho$ 는 밀도,  $A_w$ 는 와이어의 단면적,  $v_m$ 은 와이어 용융속도,  $L_e$ 는 돌출길이(wire extension),  $a$ 와  $b$ 는

상수를 나타낸다.

용적의 변위를 구하기 위하여 시간에 따라 변화하는 용적의 질량과 힘을 계산하고 식(5)의 가속도를 수치적분하였다. 용적의 이탈 조건으로 식(3)을 적용하였으며, 변위의 한계값을 계산하기 위하여 용적 이탈시 와이어에 잔류하는 용융부의 형상이 원추형이고 잔류량은 전체 용적의 25%라고 가정하였다<sup>2)</sup>.

수치적분을 이용하여 용적의 속도와 변위를 계산할 수 있지만, 용적에 가해지는 가속력이 일정하다고 가정하면( $F_a = F_0$ ), 용적의 속도와 변위를 해석식으로 구할 수 있다.

$$v = \frac{F_0}{\dot{m}_p} \ln \left( \frac{\dot{m}_p t}{m_i} + 1 \right) \tag{8}$$

$$z = z_0 + \frac{F_0}{\dot{m}_p} \left( -t + \left( t + \frac{m_i}{\dot{m}_p} \right) \ln \left( \frac{\dot{m}_p t}{m_i} + 1 \right) \right) \tag{9}$$

위의 식에서 일정한 가속력( $F_0$ )은 이탈하는 용적의 직경이 와이어 직경과 동일한 경우( $D_a = D_w$ )에 발생하는 힘을 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

피크 전류가 350A이고 아크 각도( $\theta$ )가 90도인 조건에서 직경 1.2mm 인 강 와이어에 부착된 용적의 크기가 용적에 미치는 영향을 Fig. 3에 나타내었다. 계산에 사용된 물성치와 상수를 Table 1에 정리하였다. 표면장력에 의한 부착력은 일정하지만, 전자기력과 모멘텀은 용적의 크기에 따라 변화한다. 용적의 크기가 증가하면 전자기력은 선형적으로 증가하고, 모멘텀은 용적의 직경비가 1.15 부근( $D_a / D_w \approx 1.15$ )에서 최대값이고 이후 점차 감소한다. 용적이 작은 경우에는 용적에 가해지는 힘은 음의 값으로서 부착력이 이탈력보다

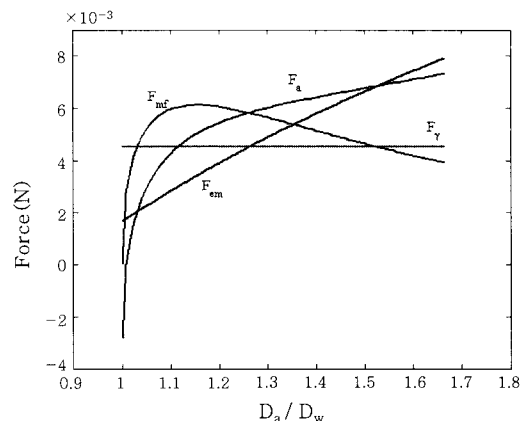


Fig. 3 Effect of pendant drop size on forces

**Table 1** Material properties and constants used for calculation

Mass density, $\rho$ , steel	$7.86 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$
Al	$2.68 \times 10^3 \text{ Kgm}^{-3}$
Surface tension coefficient, $\gamma$ , steel	$1.2 \text{ Nm}^{-1}$
Al	$0.6 \text{ Nm}^{-1}$
Constants for arc heating, a	
Steel wire 1.2mm	$0.264 \text{ mmA}^{-1}\text{s}^{-1}$
Al wire 1.2mm	$0.75 \text{ mm A}^{-1}\text{s}^{-1}$
Constants for joule heating, b	
Steel wire 1.2mm	$5.86 \times 10^{-5} \text{ A}^{-2}\text{s}^{-1}$
Al wire 1.2mm	0
Permeability in space, $\mu_0$	$4\pi \times 10^{-7} \text{ Hm}^{-1}$
Drag coefficient, $C_D$	0.44
Density of argon gas, $\rho_g$	$1.784 \text{ Kgm}^{-3}$

크다. 그러나 용적의 크기가 증가하면서 이탈력이 부착력보다 커지면서 용적에 작용하는 힘은 급격하게 양의 값을 갖게 되므로 용적의 가속력으로 작용하여 용적의 변위가 발생한다. 전류가 낮거나 용적의 크기가 작아 용적에 작용하는 힘이 음의 값을 갖는 경우에는 용적의 가속력을 0으로 설정하였다.

식(8)의 용적 이탈 속도식을 이용하여 펄스 인자가 용적 이탈에 미치는 영향을 분석하였다. 식을 단순화시키기 위하여 저항열에 의한 와이어 용융을 무시하고 ( $bL_e I^2 = 0$ ), 용적의 속도가 한계치 이상으로 증가하면 용적이 이탈한다고 가정하면 ( $v \geq v_{cr}$ ), 식(8)로부터 구한 용적 이탈시간은 다음과 같다.

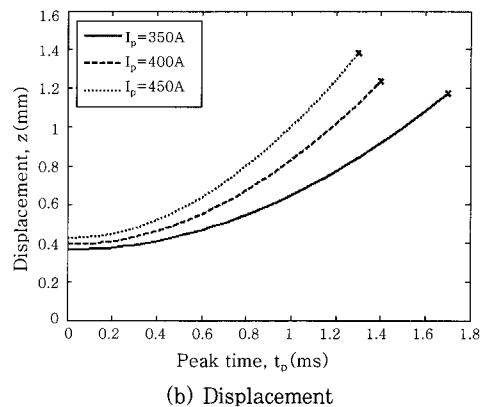
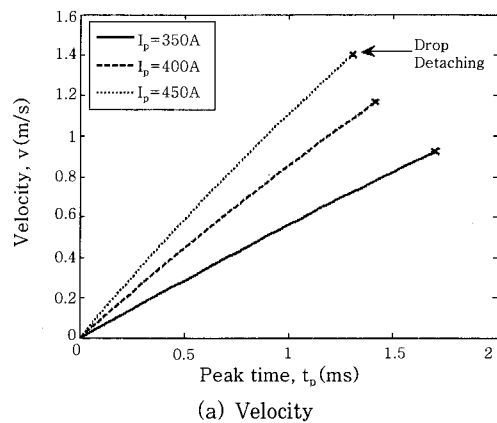
$$t_{pd} = \frac{m_i}{\dot{m}_p} \left( \exp\left(\frac{\dot{m}_p v_{cr}}{F_0}\right) - 1 \right) = \frac{m_i}{\rho A_w a I_p} \left( \exp\left(\frac{\rho A_w a v_{cr}}{k I_p - \pi D_w \gamma / I_p}\right) - 1 \right) \quad (10)$$

위의 식으로부터 피크 전류가 용적의 이탈에 가장 큰 영향을 주고, 전류가 증가하면 용적의 이탈 시간은 감소함을 알 수 있다. 또한, 용적의 초기 질량( $m_i$ )이 증가하면 용적의 이탈 시간이 선형적으로 증가하는데, 이는 질량의 증가에 따라 가속도가 감소하기 때문이다. 그러므로 베이스 구간이나 추가 피크 시간( $t_{pa}$ ) 동안 발생한 용융량은 용적의 이탈 시간에 영향을 준다. PIT와 와이어 용융식을 사용한 Allum의 해석 모델에서는 초기 질량이 증가하면 이탈 시간이 단축되고 이는 실험 결과와 다른 것으로 보고되었다<sup>2)</sup>. 이와 같은 해석 결과와 실험 결과의 불일치는 Allum의 모델이 단순히 와이

어 용융에 의해 증가하는 용적의 길이를 계산하고 PIT를 이용하여 이탈 여부를 판정하고, 용적에 작용하는 힘을 고려하지 않았기 때문에 발생하였다. 식(8)과 식(9)를 이용한 용적의 속도와 변위는 수치적분에 의한 계산 결과와 매우 유사하며, 향후의 계산은 수치적분으로 구한 결과를 사용하였다.

Fig. 4는 피크 전류에 의해 변화하는 용적 중심의 속도와 변위를 나타내며, 계산에 사용된 베이스 전류와 시간은 100A와 5ms, 피크 구간에서 추가 피크 시간은 1ms이다. 피크 전류가 가해지면 용적의 속도는 거의 선형적으로 증가하고, 변위는 포물선 형상으로 빠르게 증가한다. 피크 전류가 증가하면 용적의 속도와 변위가 증가하며, 변위가 일정 값 이상으로 증가하면 용적이 이탈한다. 피크 전류가 350A, 400A 및 450A에서 용적의 이탈에 필요한 피크 시간은 각각 1.72ms, 1.4ms, 1.3ms 이다.

용적의 초기 질량( $m_i$ )이 용적 이탈에 소요되는 피크 시간에 미치는 영향을 Fig. 5에 나타내었으며, 계산에 사용된 추가 피크 시간( $t_{pa}$ )는 1ms 이다. 용적의 이탈 시간은 초기 질량에 비례하여 선형적으로 증가하며, 이는 식(10)의 결과와 일치한다. 초기 질량은 베이스 구



**Fig. 4** Effect of current on velocity and displacement of pendant drop

간( $t_b$ )과 추가 피크 시간 ( $t_{pa}$ )에서 발생하는 용융량과 용적 이탈시 와이어에 잔류하는 질량( $m_r$ )의 합이기 때문에 베이스 전류와 시간 및 추가 피크 시간이 GMAW-P의 용적이행에 영향을 준다.

힘-변위 모델의 타당성을 검증하기 위하여 기존의 모델 및 실험 결과와 비교하였다. 직경 1.2mm인 알루미늄 와이어를 사용하는 경우, ODOP 가 발생하는 피크 전류와 시간에 대한 해석 결과와 실험 결과<sup>2)</sup>를 Fig. 6에 나타내었다. 알루미늄의 열전도도가 높기 때문에 저항열에 의한 와이어 용융은 무시하였으며, 베이스 구간의 전류와 시간은 ( $I_b t_b = 0.2A \cdot s$ ) 이고 추가 피크 시간은 1ms 이다. 동일한 피크 전류에 대해 힘-변위 모델로 계산한 피크 시간은 실험값보다 크며, 피크 전류가 200A 이하인 경우에는 실험 결과와 계산 결과는 차이가 발생하지만, 피크 전류가 200A 이상으로 증가하면 힘-변위 모델과 Allum의 모델은 실험 결과를 비교

적 정확하게 예측하였다. 힘-변위 모델을 이용하여 ODOP 이 발생하는 범위를 그림에 포함시켰으며, 이 범위는 피크 전류가 고정된 상태에서 베이스 전류와 시간을 변화시키며 ODOP가 발생하는 피크 시간을 계산한 결과이다. 그림에 보인 바와 같이 ODOP가 발생하는 영역은 상당히 넓으며, 피크 전류가 증가할수록 영역의 폭은 감소한다. 이와 같은 ODOP의 영역 중에서 용접속도와 비드 폭 등의 용접변수를 고려하여 용도에 맞는 적절한 인자를 선택할 수 있다. 일반적으로 힘-변위 모델로 계산한 피크 시간은 Allum의 모델의 피크 시간에 비해 길기 때문에 힘-변위 모델을 이용하여 ODOP가 발생하는 조건을 안정적으로 예측할 수 있다.

직경 1.2mm인 강 와이어에서 ODOP가 발생하는 용접 조건에 대한 해석 결과와 실험 결과<sup>2,8)</sup>를 비교하여 Fig. 7에 나타내었다. Matsuda<sup>8)</sup>의 실험 결과는 듀티(duty cycle,  $\delta = t_p / (t_p + t_b)$ )가 50%로 고정된 상태에서 구한 ODOP 조건이므로 힘-변위 모델에서는 실험 조건과 동일한 베이스 전류와 시간을 사용하여 ODOP가 발생하는 피크 시간의 영역을 계산하였다. 힘-변위 모델로 예측한 ODOP 영역은 Matsuda의 실험 결과를 상당히 정확하게 예측하였다. Allum의 해석 및 실험 결과는 Matsuda의 ODPP 영역 내부에 존재하며 힘-변위 모델로 예측한 범위에 포함된다. 이와 같은 실험 결과의 차이는 사용한 용접기의 성능과 펄스 용접 조건이 다르기 때문으로 추정하며, 힘-변위 모델을 이용하여 ODOP가 발생하는 영역을 비교적 예측할 수 있으므로 최소한의 실험으로 최적 용접조건을 구할 수 있다.

본 연구에서 사용한 펄스 형상은 이상적인 사각형 파형이지만, 실제의 펄스 파형은 용접기 특성에 따라 변화하고 사각형 파형 이외의 전류 파형을 사용하고 있

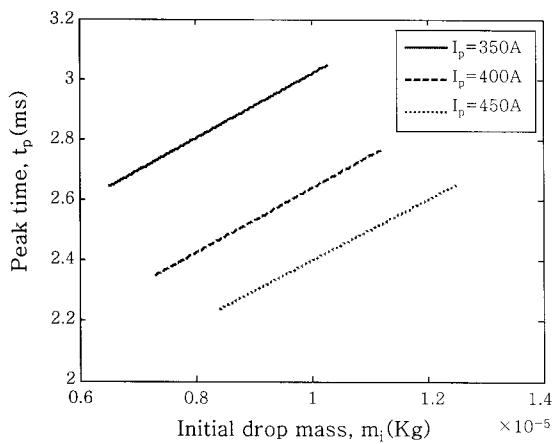


Fig 5 Effect of initial drop mass on peak time

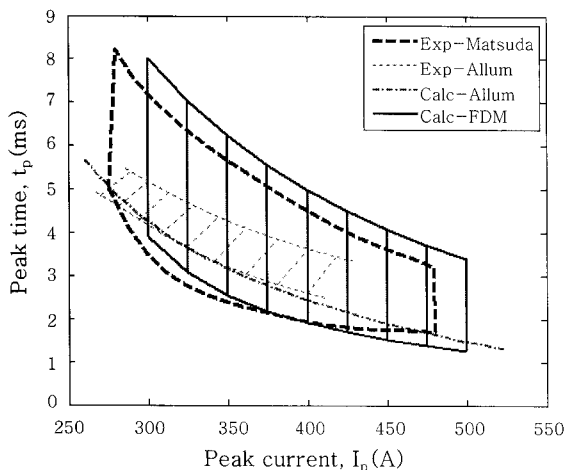


Fig. 6 Comparison of predicted results and experimental data of ODOP condition for 1.2mm aluminum wire

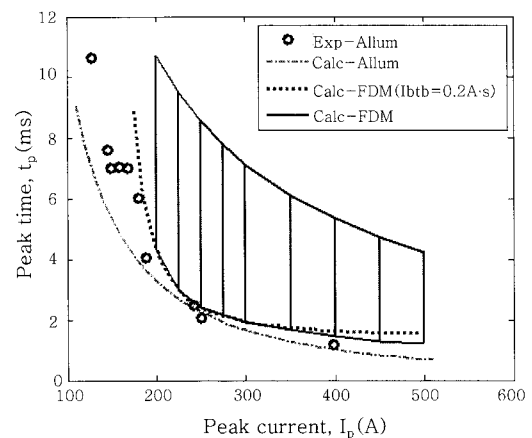


Fig. 7 Comparison of predicted results and experimental data of ODOP condition for 1.2mm steel wire

다. 본 연구에서 제안한 힘-변위 모델은 이와 같은 펄스 파형에 대해서도 적용이 가능하므로 이에 대한 연구가 필요하며, MDOP와 ODMP가 발생하는 조건에 대한 추가의 연구가 필요하다.

#### 4. 결 론

GMAW-P 용접에서 ODOP가 발생하는 조건을 결정하기 위하여 힘-변위 모델을 제안하고 실험 결과와 비교하여 힘-변위 모델의 타당성을 검증하였으며, 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 힘-변위 모델은 펄스 전류에 의해 용적에 가해지는 힘에 의해 발생하는 용적의 변위를 계산하였다. 용적의 이탈 조건으로서, 용적 중심의 변위가 한계값보다 증가하면 용적이 이탈하는 것으로 판정하였으며 ( $z \geq z_{cr}$ ), 변위의 한계값은 와이어에 잔류하는 용적의 양은 전체 용적의 25%로 설정하고 용적의 이탈시 용융 와이어는 원추형으로 가정하여 계산하였다.

2) 피크 시간을 용적 이탈시간과 추가 피크 시간의 합으로 표현하였으며 ( $t_p = t_{pd} + t_{pa}$ ), 피크 및 베이스 구간에서 발생하는 와이어 용융량은 용적의 질량과 용적에 작용하는 힘에 영향을 준다.

3) 용적에 가해지는 힘을 계산하기 위하여 모멘텀을 고려한 MFBM을 사용하였으며, 시간에 따라 변화하는 용적의 질량과 힘으로부터 용적의 가속도를 계산하고, 이를 수치적분하여 용적의 변위를 계산하였다.

4) 피크 전류가 용적의 이탈 시간에 가장 큰 영향을 주며, 피크 전류가 증가하면 이탈 시간이 단축된다. 초기 용적질량( $m_i$ )도 이탈시간에 영향을 주며, 초기 용적 질량이 증가하면 용적 이탈시간이 선형적으로 증가한다. 그러므로 GMAW-P의 ODOP 조건 결정에 베이스 전류와 시간의 영향을 고려해야 한다.

5) 힘-변위 모델로 계산한 ODOP 조건은 직경 1.2mm 인 강과 알루미늄 와이어의 실험 결과와 비교적 정확하게 일치하였으며, 힘-변위 모델을 이용하여 GMAW-P의 ODOP가 발생하는 용접 변수를 결정하거나 실험 횟수를 최소화할 수 있을 것으로 예상된다.

#### 후 기

본 연구는 한국생산기술연구원의 지원을 받아 수행하였으며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. Kim Y-S and Eager T W: Metal transfer in pulsed current gas metal arc welding, *Weld. J.*, **72** (1993), 279s-287s
2. Allum C J: Metal transfer in arc welding as a varicose instability: II. Development of model for arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **18** (1985), 1447-1468
3. Subramaniam S, White D R, Jones J E and Lyons D.W.: Experimental approach to selection of pulsing parameters in pulsed GMAW, *Weld. J.*, **78** (1999), 166s-172s
4. Choi S K, Kang S R, and Lee S R: Analysis of dynamic characteristics of molten drop and pulse condition in pulsed-GMAW, *J. of KWJS*, **20** (2002), 85-91
5. Choi S K, Yoo C D and Park S G: Dynamic analysis of metal transfer in pulsed-GMAW, *J. of KWJS*, **15** (1997), 84-91
6. Nemchinsky V A: Electrode melting during arc welding with pulsed current, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, **31** (1998), 2797-2802
7. Arif N, Lee S H and Yoo C D: Analysis of globular transfer considering momentum induced by flow within molten drop in GMAW, *J. of KWJS* (2008), (to be published)
8. Matsuda F Ushio M and Tanaka Y: Metal transfer characteristics in pulsed GMA welding, *Trans. JWRI*, **12** (1983), 9-17