



회귀 분석을 이용한 용접 변수와 이탈 액적 크기의 상호 관계

최상균* · 한창우* · 이상룡* · 이영문*

*경북대학교 공과대학 기계공학부

Correlation between Welding Parameters and Detaching Drop Size using Regression

Sang Kyun Choi*, Chang Woo Han*, Sang Ryong Lee* and Young Moon Lee*

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

Abstract

Metal Transfer in gas metal arc (GMA) welding is a complex phenomenon affected by many parameters of the welding conditions and material properties. In this research, the correlation equation between the welding condition and detaching droplet size and detaching velocity in GMA welding was studied via regression analysis on the results of numerical analysis using the volume-of-fluid (VOF) method. Welding parameters and material properties were grouped into three dimensionless numbers and detaching droplet size was expressed as the function of them. Second order and exponential multi-variable correlation forms were assumed, and the coefficients of these equations were calculated for globular and spray modes as well as entire transfer modes. Applying correlation equation into available experimental data, it shows good agreement.

(Received September 21, 2001)

Key Words : GMAW, Metal transfer, Detaching drop size, VOF Method, Correlation, Numerical analysis, Regression analysis

1. 서 론

GMA 용접의 금속 이행 현상은 용접 전류와 전압, 와이어 송급 속도, 차폐 가스 등과 같은 용접 조건 외에도, 용접봉의 밀도, 표면장력계수, 점성, 비열, 열전도 계수 등의 다양한 물성치에 의해 영향을 받는다. 금속 이행 현상은 생산성뿐만 아니라 용접품의 품질 및 최종 형상을 결정하므로 지금까지 많은 연구자들이 금속 이행에 관한 연구를 지속적으로 진행하여 왔다¹⁾. 금속 이행에 관한 실험적 연구들은 용접 조건이나 재료를 변화시키며 금속 이행을 관찰하는 것이 주류를 이루고 있는데^{2,3)}, 용접 공정의 특성상 고온 및 강한 아크 빛으로 인하여 관찰이 곤란하고, 용접 변수들이 복잡하게 연관되어 있어서 연구자가 원하는 특정한 조건을 얻기가 매우 어렵다. 따라서 해석적 연구가 실험적인 연구와 병행하여 진행되고 있다.

현재 가장 널리 사용되고 있는 정적 힘 평형 모델

(Static Force Balance Model)⁴⁾이나 핀치 불안정성 이론(Pinch Instability Theory)⁵⁾들은 용융부의 형상을 이상적으로 가정하고 중요한 인자들만을 고려하는 정적인 해석 방법이다. 이들 모델은 간단하다는 장점이 있지만, 시간에 대한 액적 형상 변화를 예측할 수 없고 용융부 내부의 유동이나 압력에 대한 정보를 얻을 수 없다. 따라서 이 방법들은 입상 용적 모드나 스프레이 모드와 같이 제한된 범위에서만 유효하거나 오차가 큰 단점을 가지고 있다. 최근 제안된 수치해석 방법을 이용한 동적 해석^{6,7)}은 용융부의 비정상 유동을 자유표면을 고려하여 해석한 것으로 시간에 대한 변화와 용융부 내부의 속도, 압력, 전자기력 등에 관한 상세한 정보를 예측할 수 있고, 따라서 정적인 해석보다 더 정확하지만, 알고리즘이 복잡하고 계산 시간이 오래 걸리므로 현장에서 쉽게 적용하기는 곤란하다.

금속 이행에 영향을 미치는 인자들의 수가 매우 많으므로 실험이나 해석에 의하여 다양한 인자들의 영향을 상세히 살펴보는 것은 매우 어렵다. 이와 같은 어려움

을 해결하기 위하여, 최근에 무차원수를 이용하여 금속 이행에 관여하는 인자들을 무차원수로 그룹화하고, 수치 해석을 통하여 금속 이행의 특성을 분석한 연구가 수행되었다⁸⁾. 이 연구에서는 Ar을 보호 가스로 사용하는 GMA 용접의 금속 이행에 영향을 주는 인자들 We, Bo, N_{SE}와 같은 무차원수 3개로 표현하였으며 각각의 무차원수의 영향을 수치 해석을 통하여 분석하였다. 그러나 이 연구에서 정성적인 특성은 살펴 보았으나 다양한 용접 변수에 대해 이탈 액적의 크기나 속도와 같은 종속 변수를 결정할 수 있는 식의 형태를 제안하지 못하고 있다. 본 연구에서는 Ar을 보호가스로 사용한 GMA 용접의 동적 해석의 결과들을 회귀 분석하여 용접 조건이 주어졌을 때 이탈 액적의 크기 또는 이탈 액적의 속도를 쉽게 계산할 수 있는 함수 형태로 제안하고 실험 결과와 비교하여 유효성을 검증하였다.

2. 차원해석 및 수치해석 방법

GMA 용접의 금속 이행 현상에서 액적의 크기나 속도, 주파수와 같이 살펴 보고자 하는 물리량을 ψ 라고 하면, ψ 는 다음과 같이 용접봉의 물성치와 용접 조건의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\psi = f(\rho, \mu, \gamma, I, \mu_0, g, d_w, v_m) \quad (1)$$

여기에서 ρ 는 용융 금속의 밀도, μ 는 점성계수, γ 는 표면장력계수, I 는 용접 전류, μ_0 는 투자율, g 는 중력가속도, d_w 는 용접봉의 지름 그리고 v_m 은 용접봉의 용융속도를 나타낸다. 용접봉의 용융속도는 정상 상태의 용접 조건에서는 용접봉의 송급 속도와 동일하다. 식(1)에 Π 정리⁹⁾를 도입하면, We, Bo, N_{SE}, N_{SV}와 같은 4개의 무차원수를 얻을 수 있다⁸⁾.

$$\begin{aligned} We &= \frac{\rho d_w v_m^2}{\gamma}, & Bo &= \frac{\rho d_w^2 g}{\gamma} \\ N_{SE} &= \frac{\mu_0 I^2}{d_w \gamma}, & N_{SV} &= \frac{\mu v_m}{\gamma} \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 S 와 V 는 각각 표면장력과 점성력을 나타낸다. 유도된 We, Bo, N_{SE}, N_{SV}들은 각각 표면장력에 대한 관성력, 중력, 전자기력, 점성력의 정성적 효과비를 나타낸다. 한편, 기존의 연구 결과⁸⁾로부터 GMA용접의 금속이행 현상에서 점성력은 무시할 수 있는 것으로 보고되었으므로 N_{SV}를 제외하면 금속이행의 특성들은 (3)식과 같이 3개의 무차원수들로 표현될

수 있다.

$$\psi_0 = f(We, Bo, N_{SE}) \quad (3)$$

ψ_0 는 ψ 의 무차원화된 형태로서, 이탈 용적의 지름과 이탈 속도를 각각 용접와이어의 지름과 송급속도로 나누어 무차원화시켰다. d_d 는 이탈 액적의 부피를 구로 환산하여 계산한 상당 직경이고 v_d 는 액적의 이탈 속도를 나타낸다

$$D_0 = \frac{d_d}{d_w}, \quad v_0 = \frac{v_d}{v_m} \quad (4)$$

수치 해석은 SOLA-VOF¹⁰⁾에 전자기력의 효과를 추가한 프로그램을 사용하여 각 무차원수가 금속 이행에 미치는 영향이 분석되었다. VOF 알고리즘에 관한 설명은 기존의 연구^{6,7,10)}에 상세하게 설명되어 있으므로 여기에서는 지배 방정식과 경계조건에 대해 간략히 기술한다. 용접봉의 용융부는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 축 대칭으로 가정하였으며 용융부 표면의 전류 밀도는 z축을 따라 선형적으로 증가한다고 가정하였다. 용융 금속의 물성치는 일정하고 비압축성 유체로 가정하면 용융금속의 유동은 연속식과 운동량 보존식에 의하여 지배된다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial v_r}{\partial r} + \frac{\partial v_z}{\partial z} + \frac{v_r}{r} &= 0 \\ \frac{\partial v_r}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_r}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_r}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial r} + \\ \nu \left[\frac{\partial^2 v_r}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} - \frac{v_r}{r^2} \right] + \frac{f_r}{\rho} \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_r \frac{\partial v_z}{\partial r} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \end{aligned} \quad (5)$$

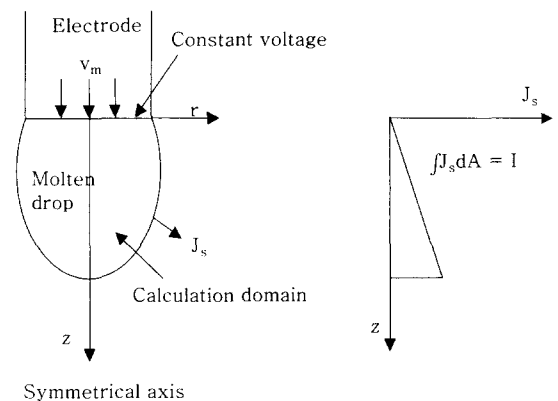


Fig. 1 Molten drop geometry and boundary condition

$$\nu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial r^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial v_r}{\partial r} \right] + \frac{f_z}{\rho} \quad (6)$$

$$\mathbf{f} = \rho \mathbf{g} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (7)$$

여기에서 ρ 와 ν 는 각각 밀도와 동점성계수를 나타낸다. 체적력 \mathbf{f} 는 중력과 전자기력의 영향을 포함하며, \mathbf{J} 와 \mathbf{B} 는 용접 전류에 의하여 발생하는 전류 밀도와 자속 밀도를 나타내는 벡터이다. 전류 밀도는 라플라스 방정식을 계산함으로써 전압 분포로부터 구할 수 있다. VOF법은 자유표면을 기술하는 알고리즘으로 계산 영역을 셀로 나누고 각 셀에서 유체가 차지하는 부피의 분율을 함수 F 로 표시한다. F 는 유동의 변화에 대해서 다음 식 (8)을 만족시켜야 하므로 이를 계산함으로써 임의의 순간에 각 셀의 유체량을 알 수 있고 이를 이용하면 자유 표면 정보를 알 수 있다. 초기 형상과 경계 조건이 결정되면 전자기력 및 유동장이 계산되고 (8)식에 의하여 새로운 자유 표면의 형상이 계산되며 시간 스텝을 증가시켜 다음으로 진행하게 된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} = 0 \quad (8)$$

3. 회귀식의 형태 및 계산 결과

3.1 회귀식의 형태

회귀식은 일반적으로 차수가 높을수록 표현하고자 하는 물리 현상을 잘 나타낼 수가 있지만 복잡해져서 사용하기에 어려운 단점이 있다. 금속 이행에서는 무차원 수들이 서로 연관되어 있으므로 1차식을 사용하기 어려우므로 본 연구에서는 식(9)와 같은 일반적인 2차 다변수 회귀식과 식(10)과 같이 보다 단순한 지수 형태의 식을 가정하였다.

$$\begin{aligned} \phi_0 = & A_0 + A_1 We + A_2 Bo + A_3 N_{SE} + A_4 WeBo \\ & + A_5 BoN_{SE} + A_6 N_{SE} We + A_7 We^2 \\ & + A_8 Bo^2 + A_9 N_{SE}^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$$\phi_0 = B_0 + B_1 We^{B_2} Bo^{B_3} N_{SE}^{B_4} \quad (10)$$

위 식의 무차원수들 중에서 N_{SE} 는 15에서 90사이에서 변화시켰는데 이는 1.6mm 강 용접봉에서 전류 153A에서 376A까지의 값에 해당한다. 실험 결과²⁾를 보면 용융 속도는 4~10cm/s으로 변화하므로 기준을 7cm/s으로 정하였다. 이 때의 We 는 0.05의 값을 가지며 용융속도를 변화시켜서 We 의 값을 0.025~0.25

로 변화시키며 해석하였다. Bo 는 표준 중력 가속도에 대하여 0.16의 값을 가지며, 중력 가속도의 값을 다르게 가정하여 0.04~0.32로 변화시켰다. 따라서 이 영역에는 실험을 통해서 얻어질 수 없는 영역도 포함되어 있다. 식 (9)와 (10)에 포함된 미지수 A 와 B 들은 수치해석 결과와 회귀식 결과의 오차가 최소가 되도록 결정되었다.

$$\varepsilon_d = \sum_i \frac{|D_{0i} - D_{ci}|}{D_{ci}} \quad (11)$$

$$\varepsilon_v = \sum_i \frac{|v_{0i} - v_{ci}|}{v_{ci}} \quad (12)$$

여기에서 ε_d 와 ε_v 는 이탈 액적의 직경과 속도에 관련된 오차이고 D_{0i} 와 D_{ci} 및 v_{0i} 와 v_{ci} 는 수치해석과 회귀식의 무차원 이탈 액적 직경 및 속도를 나타낸다. 이 오차들은 모든 데이터가 동일한 중요도를 갖게 하기 위하여 정준화되었다.

3.2 입상용적모드의 결과

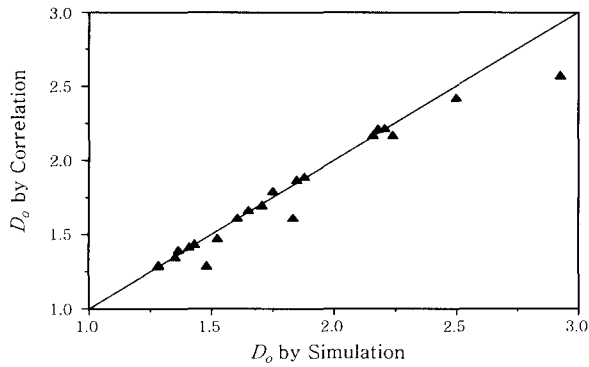
수치해석 결과 중에서 이탈 부피를 구로 환산하고 환산 직경이 용접봉의 직경보다 큰 입상용적모드의 것만을 선택하여 회귀분석을 실시하였다. 2차 회귀식에 대하여 계수들을 계산한 결과, 이탈 액적의 크기와 이탈 속도에 대하여 다음과 같은 식을 얻을 수 있었다.

$$\begin{aligned} D_0 = & 4.166 + 1.437 We - 5.724 Bo - 0.1181 N_{SE} \\ & - 2.162 WeBo + 0.0890 BoN_{SE} + 0.0197 N_{SE} We \\ & - 3.853 We^2 + 5.677 Bo^2 + 0.00118 N_{SE}^2 \end{aligned} \quad (13)$$

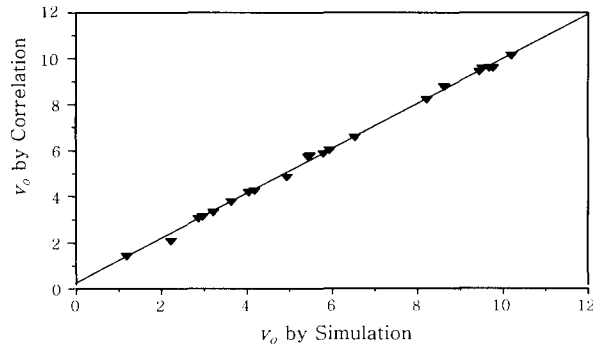
$$\begin{aligned} v_0 = & -2.096 + 6.776 We + 22.597 Bo + 0.0722 N_{SE} \\ & + 3.587 WeBo - 0.155 BoN_{SE} - 0.206 N_{SE} We \\ & - 3.254 We^2 - 28.747 Bo^2 + 0.00588 N_{SE}^2 \end{aligned} \quad (14)$$

제안된 회귀식을 수치 해석 결과와 비교하여 Fig. 2에 나타내었다. 식 (13)에서 이탈 액적의 크기의 오차는 수치해석 결과와 비교할 때 평균 2.7%였고 최대 오차는 13%였다. 한편 식 (14)에서 이탈 속도는 수치해석 결과와 비교할 때, 평균 1.7%, 최대 15%의 오차를 가졌다.

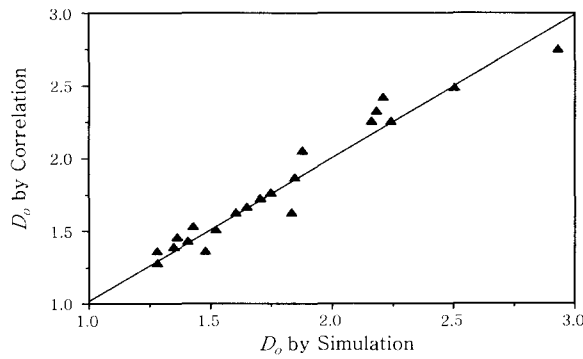
입상용적모드의 결과만을 사용한 동일한 경우에 대하여, 지수형태의 제안식 (10)의 계수들은 다음과 같이 계산되었다



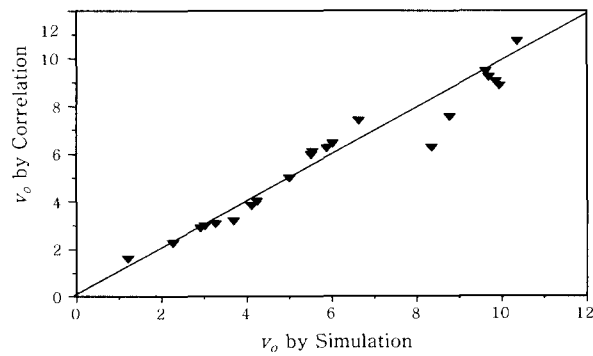
(a) Dimensionless detaching drop size



(b) Dimensionless detaching drop velocity

Fig. 2 Comparison between simulation and second order correlation in globular mode

(a) Dimensionless detaching drop size



(b) Dimensionless detaching drop velocity

Fig. 3 Comparison between simulation and exponential correlation in globular mode

$$D_0 = 0.7061 + 21.48 We^{0.065} Bo^{-0.205} N_{SE}^{-1.042} \quad (15)$$

$$v_0 = -2.960 + 0.963 We^{0.0218} Bo^{0.190} N_{SE}^{0.826} \quad (16)$$

이 경우에도 제안된 회귀식을 수치 해석 결과와 비교하여 Fig. 3에 나타내었다. 이탈 액적의 크기의 오차는 수치해석 결과와 비교할 때 평균 3.7%, 최대 오차는 12.4% 였고 이탈 속도는 평균 8.1%와 최대 29.7%의 오차를 나타내었다. 지수 형태의 식이 계수의 수가 적으므로 2차 식에 비해 큰 오차를 갖는다.

3.3 스프레이 모드의 결과

스프레이 모드의 결과에 대하여 입상용적모드와 동일한 과정을 수행하였다. 먼저 2차 회귀식에 대하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

$$\begin{aligned} D_0 = & 1.284 + 3.501 We - 0.3926 Bo - 0.0193 N_{SE} \\ & + 1.1888 WeBo + 0.00235 Bo N_{SE} \\ & - 0.00758 N_{SE} We - 5.494 We^2 + 0.3894 Bo^2 \\ & + 0.00011 N_{SE}^2 \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} v_0 = & -9.9426 - 44.09 We + 1.640 Bo + 0.7018 N_{SE} \\ & - 6.6854 WeBo + 0.0623 Bo N_{SE} - 0.944 N_{SE} We \\ & + 237.26 We^2 - 9.217 Bo^2 - 0.0013 N_{SE}^2 \end{aligned} \quad (18)$$

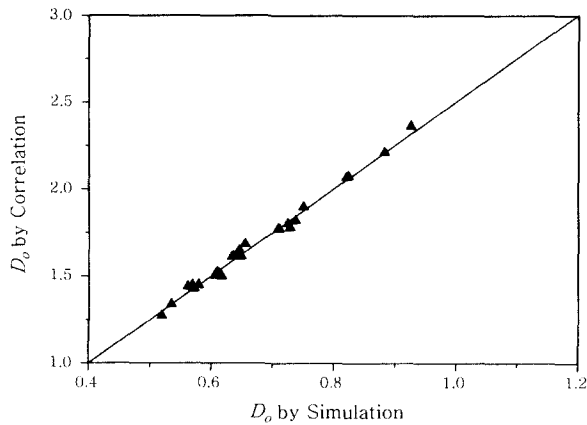
제안된 회귀식을 수치해석 결과와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 이탈 액적의 크기에 대해서 식 (17)은 평균 1.2%, 최대 3.3%의 오차를 가지고, 이탈 속도에 대해서 식 (18)은 평균 1.2%, 최대 6.3%의 오차를 갖는 것으로 계산되었다. 동일한 과정을 지수 형태 회귀식에 대하여 적용한 결과 (19)식과 (20)식을 얻을 수 있었는데, (19)식은 평균 1.8%, 최대 7.3%의 오차를 나타내었고, (20)식은 평균 1.7% 및 최대 7.4%의 오차를 나타내었다. Fig. 5에 (19), (20)식과 해석 결과를 비교하였다.

$$D_0 = 0.30 + 21.456 We^{0.407} Bo^{0.0122} N_{SE}^{-0.7032} \quad (19)$$

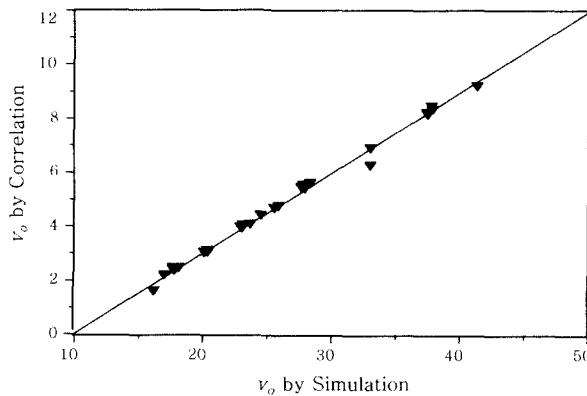
$$v_0 = 0.995 + 0.079 We^{-0.189} Bo^{0.004} N_{SE}^{1.239} \quad (20)$$

3.4 전체 모드에 대한 결과

입상용적모드와 스프레이모드를 구분하지 않고 전체 데이터를 회귀 분석에 사용하였다. 2차 회귀식에 대해



(a) Dimensionless detaching drop size



(b) Dimensionless detaching drop velocity

Fig. 4 Comparison between simulation and second order correlation in spray mode

서 계산한 결과 (21)식과 (22)식을 얻었고 지수 형태 회귀식에 대해서는 (23), (24)식을 얻을 수 있었다.

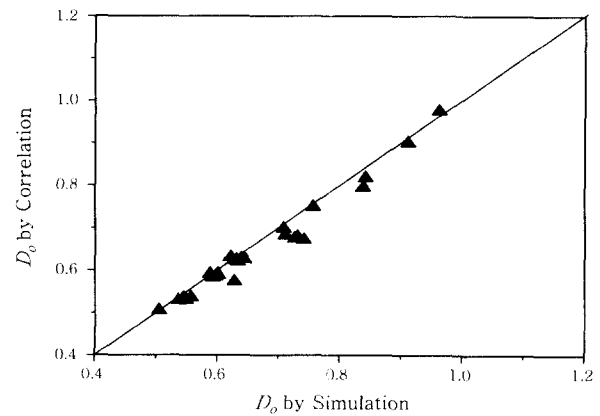
$$D_0 = 3.117 + 1.965 We - 1.592 Bo - 0.0646 N_{SE} - 0.5138 WeBo + 0.01768 BoN_{SE} - 3.9411 We^2 + 0.5393 Bo^2 + 0.00039 N_{SE}^2 \quad (21)$$

$$v_0 = -3.9733 + 13.476 We + 21.47 Bo + 0.2377 N_{SE} + 2.3256 WeBo - 0.0628 BoN_{SE} - 0.5596 N_{SE} We - 5.2870 We^2 - 29.236 Bo^2 + 0.00284 N_{SE}^2 \quad (22)$$

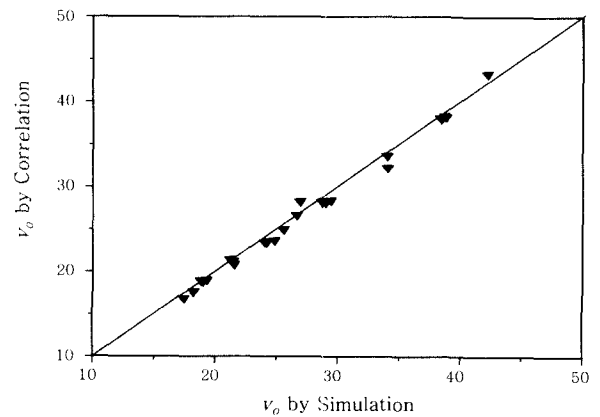
$$D_0 = 0.0314 + 22.234 We^{0.0072} Bo^{-0.0588} N_{SE}^{-0.849} \quad (23)$$

$$v_0 = -1.184 + 0.094 We^{-0.089} Bo^{0.10} N_{SE}^{1.325} \quad (24)$$

전체 모드에 대하여 구한 결과와 입상용적모드와 스프레이모드를 구분하여 구한 결과를 비교해 보면 전체 모드의 경우에 오차가 더욱 크게 나타났다. 2차 회귀식이 사용되었을 때 이탈 액적 크기의 평균 오차는 6.2%,



(a) Dimensionless detaching drop size



(b) Dimensionless detaching drop velocity

Fig. 5 Comparison between simulation and exponential correlation in spray mode

최대 오차는 26.5%였고, 이탈 속도에 대해서는 평균 6.8%, 최대 25.7%였다. 지수식을 사용하였을 때에는 액적 크기에서 평균 13.3%였고 한 점에 대해서 최대 오차는 39.8%에 달하였다. 전체 모드에 대해서 회귀 분석한 결과를 Fig. 6과 7에 나타내었다.

3.5 실험 결과와의 비교

제안된 회귀식을 검증하기 위하여 가용 실험 데이터²⁾의 용접조건으로부터 무차원수를 계산하고 회귀식으로 계산한 결과와 실험 결과를 비교하였다. 비교에 사용한 실험 데이터는 Ar을 보호가스로 사용하며, 1.6mm 직경의 강 용접봉에 대하여 다양한 용접 전류 및 돌출길이에 대하여 레이저 배경 조광 시스템(laser backlight system)을 통하여 이탈 액적의 직경을 측정하고 있다. 이탈 액적의 속도에 관해서는 비교할 실험 데이터를 구하기 어려우므로 비교하지 못하였다.

실험 데이터로부터 We, Bo, N_{SE}와 같은 무차원수를 계산하기 위해서는 실험 조건에 상응하는 용접봉의 물성치와 와이어 송급속도 등을 알아야 한다. 밀도, 표면

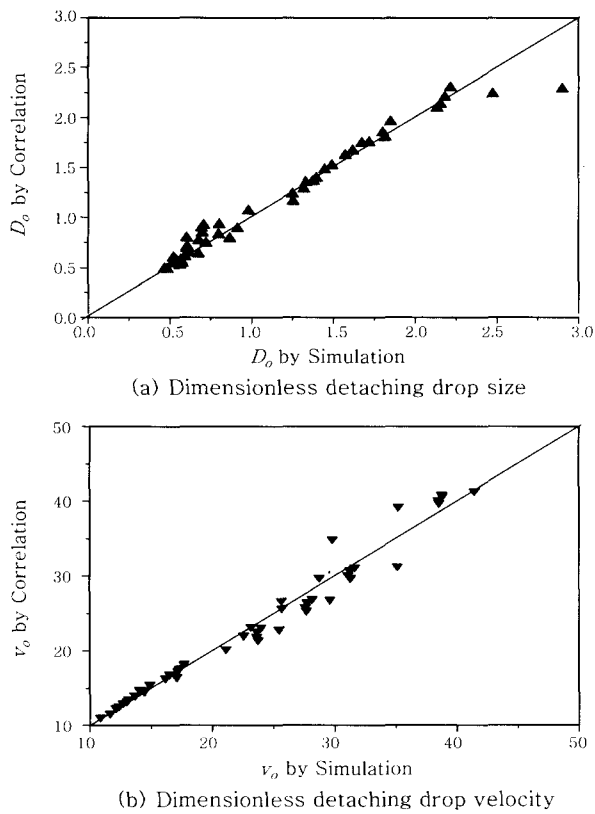


Fig. 6 Comparison between simulation and second order correlation in entire mode

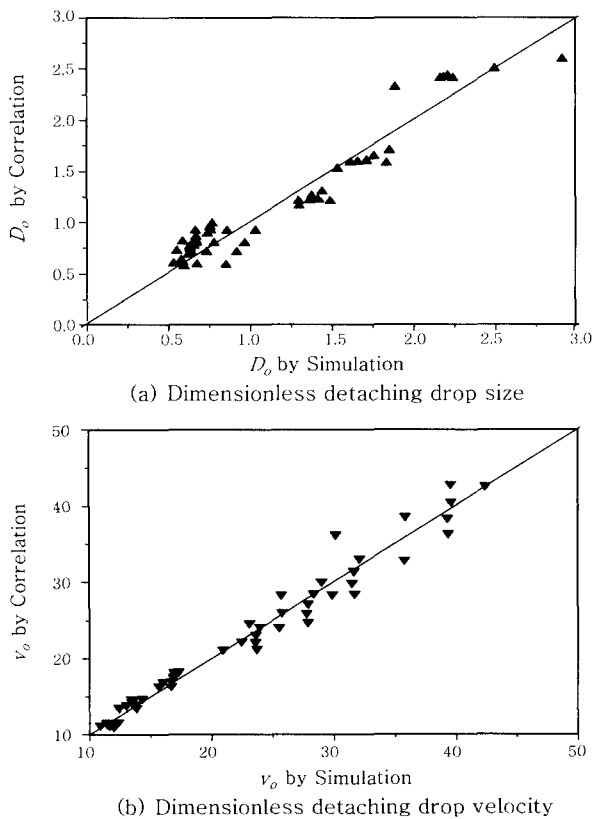


Fig. 7 Comparison between simulation and exponential correlation in entire mode

장력계수, 점성계수 등의 물성치들은 용융부의 온도, 즉 용접 전류에 따라 변화하며, 특히 표면장력계수는 GMA용접의 금속이행에 지대한 영향을 미치는 것으로 알려져 있으므로 물성치에 관한 정확한 정보를 얻는 것은 매우 중요한 일이다. 지금까지 강 용융부의 표면장력계수는 1.2, 1.5 또는 1.8N/m의 단일값이 적용되고 있으나¹⁾, 용접 전류에 따라 용융부의 온도가 크게 변화하므로 본 연구에서는 표면장력계수가 용접 전류에 대해서 선형적으로 감소하며 150A에서 1.8N/m, 350 A에서 0.9N/m의 값을 갖는다고 가정하였다. 표면장력 계수 이외의 다른 물성치들은 일정하다고 가정하였으며 이를 Table 1에 정리하였다. 한편, 와이어 송급속도는 실험 결과로부터 내삽, 또는 외삽에 의하여 계산되었다.

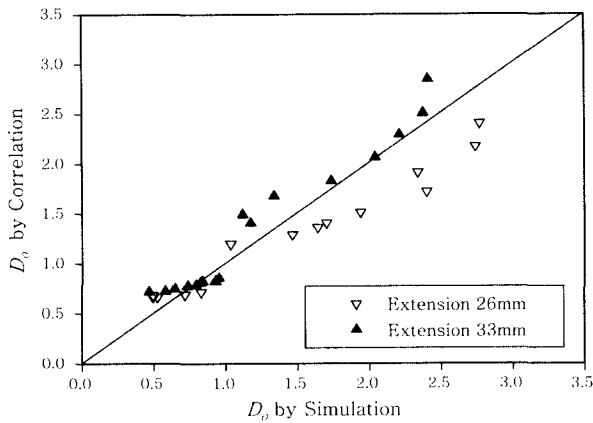
먼저 실험 결과를 용접봉의 직경을 기준으로 하여 입상용적모드와 스프레이모드의 결과로 분류하고, 용접조건으로부터 각 모드에 대한 회귀식을 이용하여 계산한 이탈 액적의 크기와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. 이 때 발생한 차이는 2차 회귀식을 사용했을 때, 평균 15.7%였고 최대오차는 한 점에 대해서 40%였다. 지수 회귀식에 대해서는 평균 17.9%, 최대 45%의 차이가 발생하였다. Fig. 8을 보면 입상용적모드에서 용접봉의 돌출길이에 의한 영향은 매우 큰 것을 알 수 있지만, 본 연구의 수치해석에서는 열적인 효과를 고려하지 못하였으므로 돌출길이에 의한 영향이 배제되어 차이가 나타난다. 스프레이모드에서는 제안식과 실험 결과간에 다소 차이가 있으며, 이는 VOF법을 이용한 수치해석 결과와 실험 결과간의 차이에 기인한다.

실험 결과를 입상용적모드와 스프레이모드로 구분하지 않고 전체 모드의 회귀식과 비교한 결과를 Fig. 9에 나타내었다. 이 때 발생한 차이는 2 차 회귀식을 사용했을 때, 평균 20.9%, 최대 44.6%였다. 지수 회귀식을 사용한 결과는 평균 18.6%, 최대 55%였다.

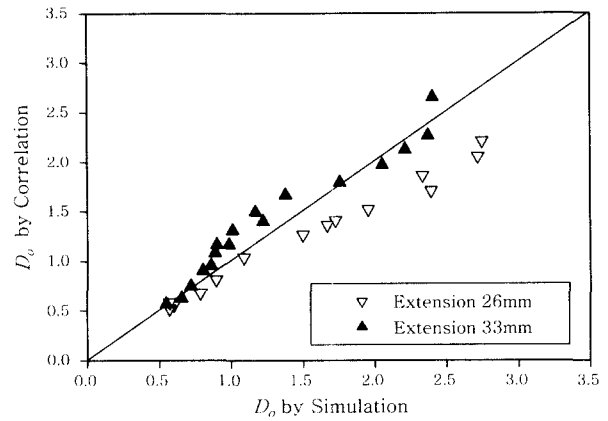
제안된 회귀식은 수치해석 결과를 이용하여 계산되었으므로 실험결과와 차이가 다소 존재한다. 실험 결과를 통하여 회귀식을 계산한다면 더 나은 결과가 예상되지만, GMA용접에서 많은 변수들은 서로 복잡하게 연관되어 있고 사용하는 재질이 제한되어 물성치나 용접조

Table 1 Material properties for simulation

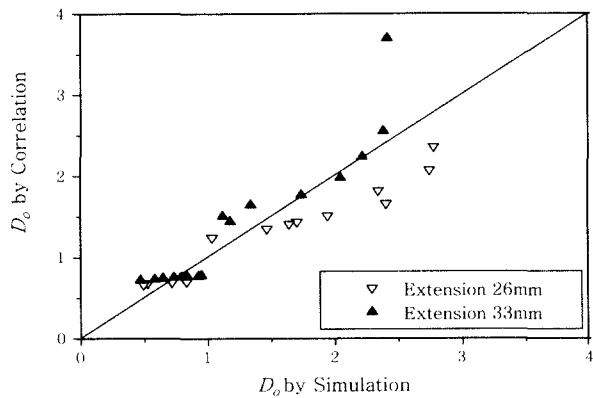
Mass Density, ρ	7860 (kg/m ³)
Kinematic Viscosity, ν	5.6×10^{-7} (m ² /s)
Surface Tension Coefficient, γ	0.9 to 1.8 (N/m)
Electrical Conductivity, σ	8.54×10^5 (mho/m)
Permeability, μ_0	$4\pi \times 10^{-7}$ (H/m)



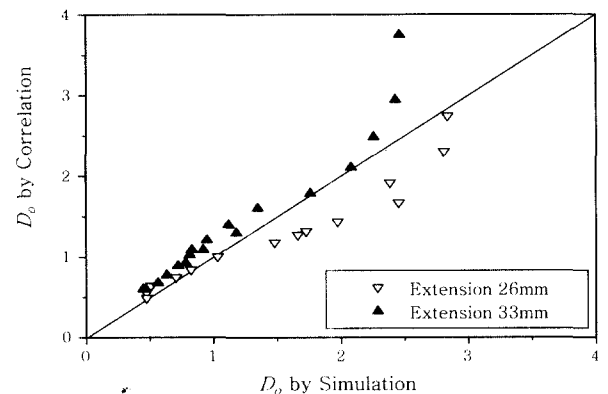
(a) Second order, eqns. (13) and (17)



(a) Second order correlation, eqn. (21)



(b) Exponential, eqns. (15) and (19)



(b) Exponential, correlation, eqn. (23)

Fig. 8 Comparison between experimental data²⁾ and the results of correlation in separated modes

Fig. 9 Comparison between experimental data²⁾ and the results of correlation in entire modes

건도 범위가 제한되므로 무차원수들을 자유롭게 변화시키는데 어려움이 따른다. 회귀식과 실험결과의 차이의 원인은 우선 VOF알고리즘을 이용한 수치해석이 갖는 시뮬레이션의 한계에서 찾아 볼 수 있다. 구체적으로 수치해석을 수행할 때, 2차원으로 가정하였고 항력 및 열적 상호작용을 무시한 것과 고-액 경계면을 단순하게 가정한 점, 자유표면에서 아크로 방출되는 전류 밀도의 가정 등이 오차에 큰 영향을 미쳤을 것이다. 특히 VOF 알고리즘을 도입한 해석 결과는 스프레이모드에서 실험 결과보다 이탈 액적의 크기를 크게 예측하고 있다. 그러나 VOF알고리즘을 이용한 해석 결과를 보면 정적 힘 평형 이론이나 핀치 불안정성 이론 등과 같은 다른 이론과 비교하여 실험에 더욱 근접한 결과를 얻고 있으므로⁶⁾, 제안식들은 간단하게 VOF알고리즘을 도입한 수치해석 수준의 정확도를 가진 결과를 예측할 수 있다. 두 번째 원인은 전술한 바와 같이 실험값에 해당하는 용접조건을 추정하는 과정에 있다. 특정 실험 값(이탈 액적 직경)에 대한 표면장력계수, 밀도, 와이어 송급 속도 등에 관한 정확한 정보가 필요하다. 또 다른 원인은 무차원수를 넓은 범위에 대하여 변화시키며 해

석하였으므로 실제로는 가능하지 않은 용접 조건이 포함되어 있을 수 있다. 이러한 데이터들에 의하여 회귀식이 영향을 받고 실험과 차이를 보일 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 GMA용접에서 이탈 액적의 크기와 속도를 예측하는 식을 We, Bo, N_{SE}와 같은 3개의 무차원수의 함수로 제안하였다. 제안된 식은 입상용적모드와 스프레이모드 그리고 전체 모드에 대하여 일반적인 2차식의 형태 및 간단한 지수식의 형태이다. 2차식의 형태가 지수식과 비교할 때 실험결과를 잘 예측하였으나 큰 차이는 보이지 않았다. 제안식은 VOF알고리즘을 사용한 수치해석 결과를 사용하여 구하였으므로 실험결과와 다소 차이가 존재하지만, 실험이나 수치해석을 이용하는 것보다 보다 간단하고 정적 힘 평형이론이나 핀치 불안정성 이론을 사용하는 것보다 정확하게 액적의 크기를 예측할 수 있다. GMA용접에 작용하는 변수들의 개수가 많고, 실제 용접에서 이 변수들을 자유롭게 변화시키는 것은 매우 어려운 일이고, VOF 알고

리즘을 이용한 수치해석은 시간이 오래 걸리므로 이 식들은 실용적으로 사용할 수 있다고 판단된다.

참 고 문 헌

1. J.F. Lancaster : The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press (1985)
2. Y.-S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D. Thesis, M.I.T (1989)
3. C.D. Allemand, D.E. Schoeder, D.E. Ries and T.W. Eagar : A method of filming metal transfer in welding arcs, *Welding Journal*, **64-1** (1985), 45-47
4. J.C. Amson : An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system, *British Welding Journal*, **41-4** (1962), 232-249
5. C.J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability : I. Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge, *Journal of phys. D : Applied Physics*, **18** (1985), 1431-1446
6. S.K. Choi, C.D. Yoo and Y.S. Kim : Dynamic Analysis of Metal Transfer using VOF Method in GMAW(I)-Globular and Spray Transfer modes-, *Journal of KWS*, **15-3** (1997), 168-177 (in Korean)
7. J. Haidar and J.J. Lowke : Predictions of metal droplet formation in arc welding, *Journal of Physics D: Applied Physics*, **29** (1996), 2951-2960
8. S.K. Choi, and C.D. Yoo : Investigation on Metal Transfer in GMA Welding through Dimensional Analysis, *Journal of KWS*, **17-1** (1999), 8-16 (in Korean)
9. F.M. White : Fluid Mechanics, 2nd Ed. McGraw-Hill, 1986
10. 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)