

여러 용접 변수와 이탈 액적 크기의 상호 관계

Correlation between Various Welding Parameters and Detaching Drop Sizes

최상균, 이상룡

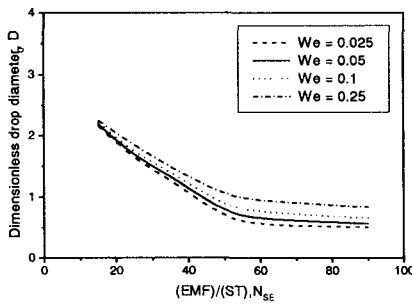
경북대학교 공과대학 기계공학부

1. 서론

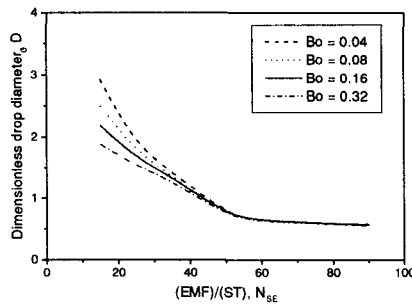
GMA 용접의 금속 이행 현상은 용접 전류, 전압, 송급속도, 차폐 가스 등과 같은 용접 조건 외에도, 용접봉의 밀도, 표면장력계수, 점성, 비열, 열전도 계수 등의 여러 물성치에 의해 영향을 받는다. GMA 용접에서 금속 용융 및 이행에 관한 연구는 많은 연구자들에 의하여 지속적으로 진행되어 왔으나 금속 이행에 영향을 미치는 인자들의 수가 너무 많으므로 실험이나 해석에 의하여 각각의 인자들의 영향을 살펴보는 것은 매우 어려운 실정이다. 최근에 무차원수를 이용하여 금속 이행에 관여하는 인자들의 수를 줄이고 수치 해석을 통하여 금속 이행의 특성을 살펴 본 시도가 있었다²⁾. 본 연구에서는 차원 해석의 결과를 응용하여, 각각의 무차원수와 GMA 용접 공정에서 이탈되는 액적의 크기 및 이탈 속도와의 상관 관계를 규명하는 것을 목적으로 한다.

2. 차원 해석

금속 이행에서 이탈 용적 직경, 속도 등과 같은 종속 변수들은 여러 독립 변수들, 즉 용접 조건 및 물성치들의 함수로 나타난다. Pi 정리를 도입하면 독립 변수들을 무차원화된 형태로 조합하여 나타내므로 변수의 수를 줄일 수 있다. 관찰하고자 하는 무차원화된 종속 변수 ϕ_o 는 식 (2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.



(a) Effect of We (Bo = 0.16)



(b) Effect of Bo (We = 0.05)

Fig.1 Effects of Dimensionless Parameters on Drop Size

수가 이탈 액적의 크기에 미치는 영향을 Fig.1에 나타내었다. We가 증가하면 이탈 용적의 크기가 증가하며, 이탈속도는 감소하는 경향이 있고 특히 N_{SE} 가 40이상인 고전류 영역에서 그 영향이 크게 나타났다. Bo의 영향은 주로 N_{SE} 가 40이하의 저전류 영역에서 나타났다.

$$We = \frac{\rho d_w v_m^2}{\gamma}, \quad Bo = \frac{\rho d_w^2 g}{\gamma}$$

$$N_{SE} = \frac{\mu_0 I^2}{d_w \gamma}, \quad N_{SV} = \frac{\mu v_m}{\gamma} \quad (1)$$

$$\phi_o = f(We, Bo, N_{SV}, N_{SE}) \quad (2)$$

여기에서 하첨자 S, E 그리고 V는 각각 표면장력과 전자기력, 점성력을 의미하며 각각의 무차원수들은 표면장력에 대한 관성력, 중력, 전자기력, 점성력의 상대적 효과비를 의미한다. 기존 연구결과에서 점성의 영향은 매우 작은 것으로 나타났으므로, N_{SV} 의 영향은 고려하지 않는다면 용융 금속 이행은 We, Bo, N_{SE} 와 같이 3개의 변수들에 의하여 표현될 수 있다.

각 무차원수들의 영향은 VOF (Volume of Fluid)법³⁾을 사용한 비정상 자유 표면 유동해석 프로그램인 SOLA-VOF에 전자기력의 영향을 추가하여 해석하였다. 해석에서 열적인 상호작용 및 차폐 가스의 항력은 금속이행에 큰 영향을 주지 않는다고 가정하였으며, 용융부 표면의 전류 밀도는 모재에 가까울수록 선형적으로 증가한다고 가정하였다. 각 무차원

3. 상호 관계 해석

무차원수들과 이탈 액적의 크기 및 이탈 속도에 관한 상호관계를 해석하기 위해서 식(2)의 형태를 식(3),(4)와 같이 2차 곡선의 형태 및 지수 곡선 형태 2가지로 가정하고, 절대값 오차의 백분율의 총합이 최소가 되도록 하는 계수를 구하였다.

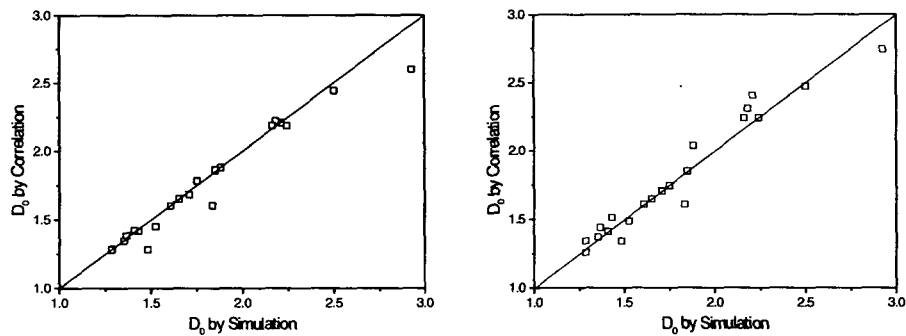
$$\phi_o = A_0 + A_1 We + A_2 Bo + A_3 N_{SE} + A_4 We Bo + A_5 Bo N_{SE} + A_6 N_{SE} We + A_7 We^2 + A_8 Bo^2 + A_9 N_{SE}^2 \quad (3)$$

$$\phi_o = B_0 + B_1 We^{B_2} Bo^{B_3} N_{SE}^{B_4} \quad (4)$$

먼저 무차원수들과 액적의 크기, 이탈 속도가 이차 곡선의 관계를 갖는다고 가정하고 (3), (4)식의 계수들을 계산하였다. 입상 용적 모드와 스프레이모드를 구분하지 않고 모든 데이터들을 하나의 상호관계식으로 나타낸 결과, 액적 크기의 경우 평균 오차는 6.2%(최대 발생 오차는 26.5%), 이탈 속도의 경우 평균 오차는 6.8%(최대오차 25.5%)로 비교적 큰 오차가 발생하였다. 지수 형태의 상호 관계식을 적용하였을 때에는 오차 값이 다소 증가하였는데 액적 크기는 13%의 평균 오차와 40%의 최대 오차, 이탈 속도의 경우 평균 11%, 최대 오차는 한 점에 대하여 60%까지도 발생하였다. 따라서 금속 이행 현상을 하나의 관계식으로 표현하는 것은 다소 무리가 있다고 판단되며 입상 용적 모드와 스프레이 모드로 나누어 해석하는 것이 타당하다.

3.1 입상 용적 모드

2차 곡선으로 가정한 경우(Eqn.3), 입상 용적 모드의 데이터들을 이용하여 상호 관계식을 구해 본 결과, 이탈 액적 직경의 평균 오차는 2.7%(최대 오차는 13%) 이었고 이탈 속도의 평균 오차는 1.7%(최대 오차는 15%)로 전반적인 오차의 크기가 크게 감소하였다. 또한 상호관계식을 지수 곡선의 형태로 가정한 경우(Eqn.4)에는 직경의 평균 오차는 3.7%(최대 오차 12%), 속도의 평균 오차는 8%, 최대오차는 30%로 나타났다. 이탈 액적의 크기에 대해 수치 해석의 결과와 상호관계식에서 계산된 결과를 비교하여 Fig.2에 나타내었다.



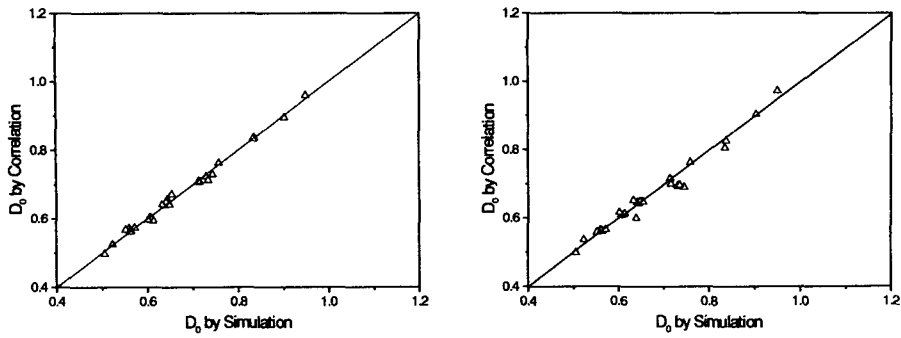
(a) Correlation using Eqn.(3)

(b) Correlation using Eqn.(4)

Fig.2 Comparison between Simulation and Correlation (Globular Mode)

3.2 스프레이 모드

2차 곡선으로 가정한 경우(Eqn.3), 액적 직경의 평균 오차는 1.2%(최대 오차는 3.3%), 이탈 속도의 평균 오차는 2.2%(최대 오차는 11%)로 나타났다. 상호관계식을 지수 곡선의 형태로 가정한 경우(Eqn.4)에는 직경의 평균 오차는 1.8%(최대 오차 7%), 이탈 속도의 평균 오차는 1.6%, 최대오차는 7.4%로 나타났다. 이탈 액적의 크기에 대해 수치 해석의 결과와 상호관계식에서 계산된 결과를 비교하여 Fig.3에 나타내었다.



(a) Correlation using Eqn.(3) (b) Correlation using Eqn.(4)
 Fig.4 Comparison between Simulation and Correlation (Spray Mode)

3.3 실험과의 비교

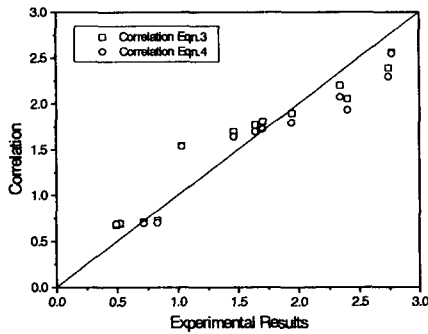


Fig.4 Comparison between Correlation and Experimental Data

으로 사료된다. 또한 무차원수의 변화 범위가 실제 용접 현상과는 상당히 동떨어진 부분이 상호관계의 정확성에 영향을 주었을 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 3개의 무차원수를 이용하여 이탈 액적의 크기와 속도를 예측할 수 있는 상호관계식을 제안하였다. 금속 이행은 입상 용적 모드와 스프레이모드 모두를 하나의 식으로 표현하기에는 무리가 있었으며 나누어 표현하는 편이 오차를 크게 줄일 수 있었다. 상호관계식은 수치 해석 결과로부터 얻어졌으므로 해석 결과와는 잘 일치하였으나, 가용 실험 결과와 비교한 결과에는 다소 차이가 있었다. 2차 곡선과 지수 곡선의 차이는 그렇게 크지 않았으며 2차 곡선을 이용한 쪽의 오차가 적었다.

5. 참고 문헌

1. Lancaster, J. F., The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press, (1985)
2. 최상균, 유중돈, "차원 해석을 통한 GMA용접의 금속 이행에 관한 분석", 대한 용접학회지, 17(1), (1999), pp. 8-16
3. Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries", Journal of Computational Physics, 39, (1981), pp.201-225
4. Kim, Y.-S., Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D. Thesis, M.I.T, (1989)