

## GMA 용접의 용융 액적에 작용하는 힘들에 관한 차원해석

### Dimensional Analysis of the forces acting on molten drop in GMA Welding

최상균(\*), 고성훈(\*\*), 유중돈(\*\*)

\*영남대학교 기계공학부, \*\* 한국과학기술원 기계공학과

#### 1. 서론

Gas Metal Arc (GMA) 용접의 금속이행은 아크 안정성과 용접부의 품질 및 생산성에 큰 영향을 미치므로 이에 대한 분석은 매우 중요하다. 금속이행은 여러 용접 변수와 재료의 물성치에 영향을 받고 있으며, 인자들의 수가 매우 많으므로, 각각의 인자가 금속이행에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것은 매우 어렵다. 이와 같은 경우에 인자의 수를 줄이며 각 인자의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 사용하는 방법으로서 차원 해석 방법을 들 수 있다.

본 연구에서는 차원 해석 방법인  $\pi$ 정리<sup>1)</sup>를 이용하여 용융 액적에 작용하는 다양한 힘들을 무차원화 하였고 VOF법<sup>2)</sup>을 이용하여 각각의 영향을 수치 해석하였다. 그리고 해석 결과를 가용한 실험 결과와 비교하여 용접 현상에 대한 차원 해석의 타당성을 검증하였다.

#### 2. 무차원수의 유도

GMA 용접의 금속이행 현상에서 용적의 크기, 이탈속도 등과 같이 관찰하고자 하는 물리량은 여러 변수들의 함수이고 이 변수들을 무차원화 함으로써 다음과 같은 무차원 수를 얻을 수 있으며 관찰하고자 하는 물리량은 식 (2)와 같은 형태로 나타낼 수 있다.

$$Re = \frac{\rho v_m d_w}{\mu}, \quad We = \frac{\rho d_w v_m^2}{\gamma}, \quad Fr = \frac{v_m^2}{d_w g}, \quad N_E = \frac{\mu_0 I^2}{\rho v_m^2 d_w^2} \quad (1)$$

$$\phi_o = f(Re, We, Fr, N_E) \quad (2)$$

여기서 하첨자 I와 E는 각각 관성력과 전자기력을 나타내고, 위 4 개의 무차원수들은 각각 관성력에 대한 점성력, 표면장력, 중력, 전자기력의 비를 나타낸다. 한편, 표면장력계수는 용융 액적의 이탈을 저해하는 중요한 힘이므로 표면장력에 근거한 무차원화가 유용할 수 있다. 새로운 무차원화의 결과로서 다음과 같은 무차원수를 구할 수 있다.

$$We = \frac{\rho d_w v_m^2}{\gamma}, \quad Bo = \frac{\rho d_w^2 g}{\gamma} (= We/Fr), \quad N_{SE} = \frac{\mu_0 I^2}{d_w \gamma}, \quad N_{SV} = \frac{\mu v_m}{\gamma} \quad (3)$$

$$\phi_o = g(We, Bo, N_{SV}, N_{SE}) \quad (4)$$

여기에서 하첨자 S와 V는 각각 표면장력과 점성력을 의미하며 위 4개의 무차원수는 각각 표면장력에 대한 관성력, 중력, 전자기력, 점성력의 상대적 효과비를 의미한다. 위에서 제시한 두가지 방법의 무차원화는 근본적으로 동일한 것이고, 실험 결과나 해석 결과를 정리하고 분석하는 방법에 차이가 있다.

#### 3. 관성력 기준의 차원해석

VOF법<sup>2)</sup>은 자유 표면 기술 알고리즘으로 이미 GMA 용접의 해석에 적용된 바<sup>3)</sup> 있다. 본 해석에 사용된 경계조건을 Fig.1에 나타내었다. 용접전류가 변화할 때 (즉,  $N_E$ 가 변화할 때), 점성력의 영향을 계산하였다.  $Fr$ 와  $We$ 를 기준 상태로 고정한 상태에서 점성력이 크면( $Re$ 가 작으면) 이탈 액적의 크기가 증가하고 이탈 액적의 속도가 감소하는 경향이 미소하게 나타났으나,  $Re$ 를 50에서 500

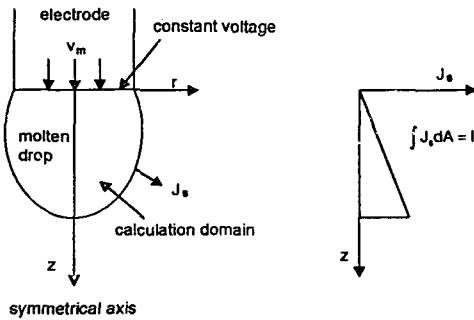


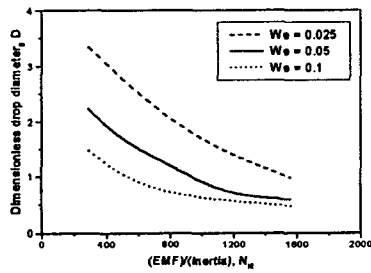
Fig.1 Molten drop geometry and boundary conditions

까지 크게 변화시키는데 비하여 용적의 크기와 이탈속도의 변화는 매우 작으므로 GMA 용접의 용융 액적에서 점성력의 영향은 무시할 수 있는 것으로 나타났다.

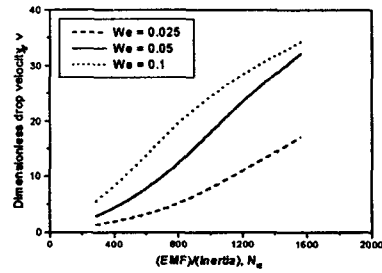
We를 변화시킬 때 무차원화시킨 용적의 지름과 이탈속도를 Fig.2에 나타내었다. 이탈 용적의 크기는 전 영역에서 We의 영향을 받으며 (Fig.2a), 표면장력이 작을수록 (We가 클수록) 용적의 크기가 작아진다. 고전류 영역에서 We가 증가하면 용적의 크기는 크게 변화하지 않는다.

Fr가 용적 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.3에 나타내었다. 중력은 저전류 영역에서 용적의 부피가 증가하므로 금속이행에 영향을 크게 미치지만, 고전류 영역에서는 큰 영향을 주지 못하며 용적의 이탈속도도 저전류 영역에서만 변화한다. 그러므로 입상용적 모드에서는 중력의 영향이 크고, 스프레이 모드에서는 중력의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작아진다.

Fr가 용적 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.3에 나타내었다.

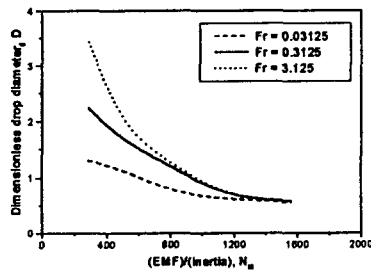


(a) drop size

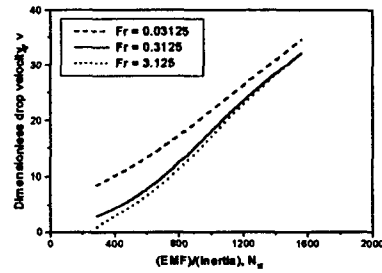


(b) detaching velocity

Fig.2 Effects of We on drop size and detaching velocity (Re = 500, Fr = 0.3125)



(a) drop size



(b) detaching velocity

Fig.3 Effects of Fr on drop size and detaching velocity (Re = 500, We = 0.05)

#### 4. 표면장력 기준의 해석 결과

앞 절의 해석 결과에서 점성력의 영향은 무시할 수 있다는 것이 밝혀졌으므로  $N_{sv}$ 의 영향은 고려하지 않았다. We가 용적의 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.4에 나타내었다. We가 증가하면 (용접부의 송급속도가 증가하면), 이탈 용적의 크기가 증가하며 (Fig.4a), 용적의 이탈속도는 감소하는 경향이 있다 (Fig.4b). 특히  $N_{sv}$ 가 40이상인 고전류 영역에서 그 영향이 크게 나타났다.

We를 0.05로 고정시킨 경우에 중력의 영향을 나타내는 Bo가 이탈 용적의 크기와 이탈속도에

미치는 영향을 Fig.5에 나타내었다.  $Bo$ 가 용적의 크기와 이탈속도에 미치는 영향은  $N_{SB}$ 가 40이하의 저전류 영역에서 현저하게 나타나지만, 전류가 증가하면 크게 영향을 미치지 못한다. 이와 같은 경향은 중력이 입상용적 이행 모드에서 큰 영향을 미친다는 Fig.3의 결과와 유사하다. Fig.4와 5에 나타난 바와 같이, 금속이행 모드의 특성을 분석하는데 가장 유용한 무차원수는 전자기력과 표면장력의 비로 표현되는  $N_{SB}$ 이며, 표면장력을 기준으로 차원 해석은 관성력을 기준으로 하는 차원 해석 방법보다 효과적이다.

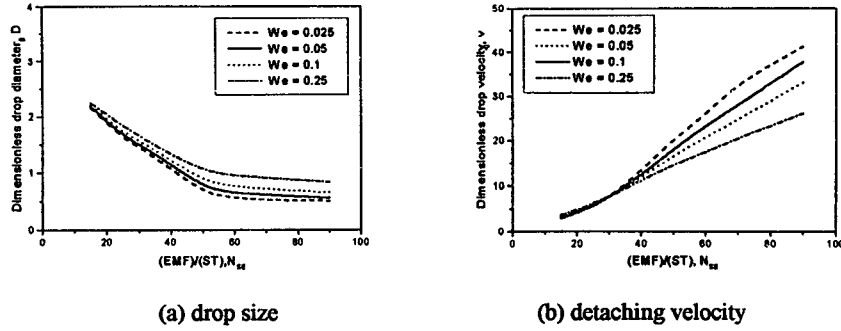


Fig.4 Effects of Weber number on drop size and detaching velocity ( $Bo = 0.16$ )

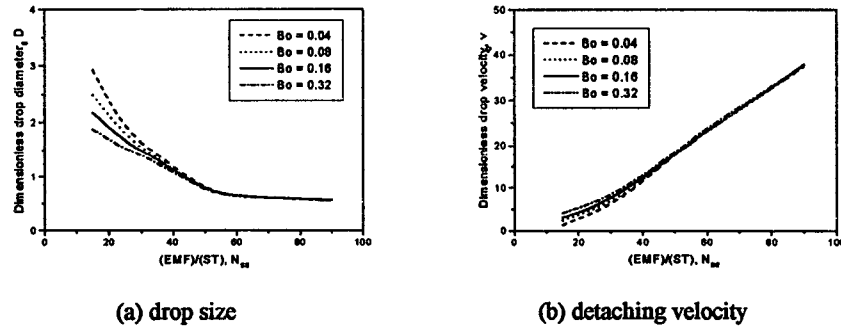


Fig.5 Effects of Bond number on drop size and detaching velocity ( $We = 0.05$ )

### 5. 천이 전류의 예측

표면장력을 기준으로 차원 해석을 수행한 결과,  $We$ 나  $Bo$ 의 영향에 따라 다소 변화하지만  $N_{SB}$ 가 40에서 50사이에서 용적과 용접봉의 직경과 비슷하므로 천이 구간이라고 할 수 있으며, 이 구간에서 용적의 이탈속도는 용접봉 송급속도의 10-20배 정도이다 (Fig.4,5). 입상용적 모드는 대략  $N_{SB}$ 가 40이하에서, 스트리밍 모드는 대략  $N_{SB}$ 가 50이상에서 발생하며,  $N_{SB}$ 의 변화에 따른 금속이행 모드를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_{SB} < 40, & \quad \text{globular mode} \\
 40 \leq N_{SB} \leq 50, & \quad \text{transition including projected mode} \\
 N_{SB} > 50, & \quad \text{streaming mode}
 \end{aligned} \tag{5}$$

강 및 알루미늄의 표면장력 계수를 각각 1.2N/m, 0.7N/m라 하고, 식(5)를 이용하여 천이 전류의 범위를 계산한 결과와 기존의 실험 결과<sup>4,6)</sup>를 비교하여 Fig.6에 나타내었다. 강 용접봉의 경우 실험 결과는 제안된 천이 구간 내에 존재하였다. 알루미늄 용접봉의 경우 계산된 값은 실험 결과보다 다소 크게 나타났지만 일반적인 추세는 일치하였다. 무차원 용적 지름에 대한 차원 해석 결과와 실험 결과를 비교하여 Fig.7에 나타내었다. 강의 표면장력 계수로 1.2N/m를 사용하면 (Fig.7a), 스프레이 모드가 발생하는 고전류 영역에서 계산 결과와 실험 결과는 비교적 일치하는 경향을 보이고 있

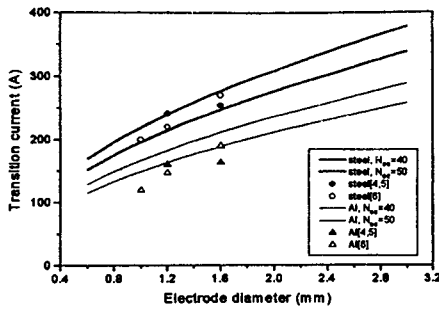
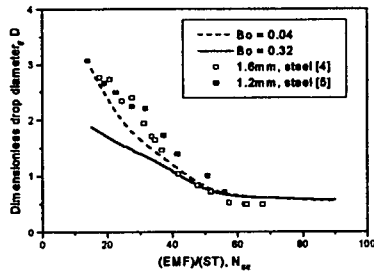
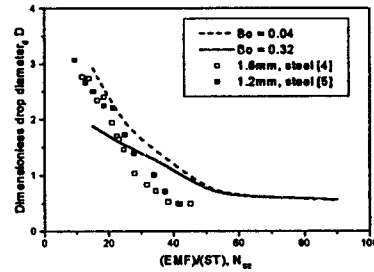


Fig. 6 Comparison between calculated and experimental transition current

다. 강의 표면장력 계수로 1.8N/m를 사용하는 경우 (Fig. 7b), 저전류 영역에서 잘 일치하며, 고전류 영역에서는 계산 결과가 실험 결과보다 크게 된다. 그러므로 입상용적 모드가 발생하는 저전류 영역에서는 표면장력 계수로 1.8N/m를 사용하고, 스프레이 모드가 발생하는 고전류 영역에서는 1.2N/m를 사용하는 것이 타당하다. VOF 법을 이용한 계산에서 항력 등을 고려하지 못하였고 실험에서 발생할 수 있는 측정 오차 등을 고려하면, 계산 결과는 실험결과와 비교적 잘 일치한다고 할 수 있다.



(a)  $\gamma = 1.2 \text{ N/m}$



(b)  $\gamma = 1.8 \text{ N/m}$

Fig. 7 Comparison between calculated and experimental drop diameter

#### 4. 결론

본 연구의 결론은 다음과 같다. (1) 차원 해석을 이용하여 금속이행에 영향을 미치는 인자들을 4개의 무차원수로 나타내었다. (2) 점성력은 GMA 용접의 금속 이행 현상에서 무시할 수 있고 중력은 저전류 영역에서만 중요하며, 송급속도의 영향은 고전류 영역에서 주로 나타난다. 표면 장력과 전자기력은 전 영역에서 중요하며,  $N_{ST}$ 는 금속 이행을 표현하는 무차원수로 사용될 수 있다. (3) 차원 해석 결과에 의한 천이 구간은  $40 < N_{ST} < 50$  이며, 강과 알루미늄 용접부에 대하여 천이 전류값을 상당히 정확하게 예측하였다. 차원 해석 결과는 실험 결과를 비교적 정확하게 예측하였으며, 표면장력 계수 값의 선정이 금속이행 해석에 큰 영향을 미친다.

#### References

1. White, F. M., Fluid Mechanics, 2nd Ed., McGraw-Hill, (1986)
2. 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
3. 최상균, 유중돈, 김용석, "VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석 (I)-입상 용적과 스프레이 이행에 관한 해석", 대한용접학회지, 15(3), (1997), pp. 168-178
4. Kim, Y.-S., Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D. Thesis, M.I.T, (1989)
5. 최상균, GMA 용접의 금속이행에 관한 동적 해석, 박사학위논문, 한국과학기술원 기계공학과, (1998)
6. Allum, C. J., "Metal transfer in arc welding as a varicose instability : II. Development of model for arc welding", Journal of Physics D: Applied Physics, 18, (1985), pp.1447-1468