

차원 해석을 통한 GMA 용접의 금속이행 현상에 관한 분석

최상균* · 유중돈**

Investigation on Metal Transfer in GMA Welding through Dimensional Analysis

Sang K. Choi* and Choong D. Yoo**

Key Words : GMAW (가스 금속 아크용접), Metal Transfer (금속이행), Dimensional Analysis (차원해석), Dynamic Analysis (동적해석), Electromagnetic Force (전자기력), Surface Tension (표면 장력)

Abstract

Since various parameters including the welding conditions and material properties are involved in metal transfer, it is difficult to figure out the effects of each parameter. In this study, dimensional analysis is performed to reduce the number of the parameters and to reveal the effect of each parameter on metal transfer. Dimensionless parameters are derived based on the inertia force and surface tension, and their contributions on metal transfer are estimated by analyzing the calculated results using the volume of fluid (VOF) method. Among several dimensionless parameters, $N_{SE} (= \mu_0 I^2 / d_w \gamma)$ which represents the ratio of the electromagnetic force to surface tension, is found to be appropriate to describe metal transfer and estimate the transition current. Predicted results of transition current and drop size are in reasonably good agreements with available experimental data which show the validity of proposed dimensional analysis.

1. 서 론

가스 금속 아크 용접 (Gas Metal Arc Welding, GMAW)의 금속이행은 아크 안정성과 용접부의 품질 및 생산성에 큰 영향을 미치므로 금속이행에 대한 분석은 매우 중요하다. 최근 MAC (Marker and Cell) 법¹⁾이나 VOF (Volume of Fluid)법²⁾과 같은 자유 표면 해석 알고리즘과 전산 유체역학의 해석 기법을 도입하여 금속이행의 동적 특성이 해석된 바있고, 실험 결과와 상당히 근접한 결과를 얻었다³⁻⁶⁾. 그러나 금

속이행 현상은 용접 전류, 전압, 용접와이어 송급속도, 보호가스 등의 용접조건과 용접와이어의 밀도, 표면장력 계수, 성, 비열, 열전도 계수 등과 같은 재료의 물성치에 영향을 받는다. 이와 같이 금속이행은 다양한 인자에 의하여 영향을 받기 때문에 금속이행에 미치는 영향을 정량적으로 분석하는 것은 매우 어렵다. 그러므로 실험에 의해 측정된 용적의 크기 등을 도표에 나타내어 용접조건에 따른 금속이행 모드로 분류하거나⁷⁾, 용적의 지름과 이탈속도 등을 직선 맞춤 (linear regression)하여 실험적으로 금속이행의 특성을 해석하는 연구가 수행되었다⁸⁾.

* 1998년 6월 9일 접수

* 정회원, 영남대학교 기계공학부

** 정회원, 한국과학기술원 기계공학과

• 최상균: choisk@yeungnam.ac.kr

이와 같이 영향을 미치는 인자가 많은 경우에 인자의 수를 줄이며 각 인자의 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 사용하는 방법으로서 차원 해석 방법을 들 수 있다⁹⁾. 차원 해석을 통하여 유도된 무차원수를 이용하면 용접 전류나 용접와이어 재질 등이 변화하는 경우에도 무차원수를 통하여 금속이행 현상을 예측할 수 있다. 금속이행에 관한 차원 해석으로 열전달에 대한 무차원수를 이용하여 용접와이어의 용융과 용적의 이탈에 미치는 영향을 실험 결과와 열전도 모델을 이용하여 정량적으로 분석하였다¹⁰⁾. 금속이행은 아크열이나 저항열에 의한 용접와이어의 용융과 함께 용적 내의 유동에 의하여 크게 영향을 받는다. 자유 표면을 갖는 유동에서 사용되는 대표적인 무차원수로서 Reynolds(Re), Froude(Fr), Weber(We) 수 등을 들 수 있으며, 금속이행 현상은 전자기력을 포함하고 있으므로 전자기력을 포함하는 새로운 무차원수를 도입하여야 한다.

기존의 연구가 용접와이어의 용융에 관한 차원 해석 임에 비하여¹⁰⁾, 본 연구에서는 금속이행에서 자유표면을 포함하는 축대칭 용적의 내부에서 발생하는 용융 금속의 유동에 관한 차원해석을 수행하였다. 본 연구에서는 차원 해석 방법인 π 정리⁹⁾를 이용하여 금속이행과 관련된 인자 들을 무차원수로 유도하였고, 2가지 방법으로 차원 해석을 시도하였다. 첫번째 방법은 유체역학 분야에서 널리 사용되고 있는 관성력을 기준으로 하는 Reynolds, Froude, Weber 수와 전자기력에 관련된 새로운 무차원수를 유도하여 차원 해석을 수행하였다. 두번째 방법은 표면장력을 기준으로 하여 무차원수를 유도하여 차원 해석을 수행하였다. 금속이행의 동적 해석은 VOF법을 이용하여 계산하였고, 무차원수를 이용한 해석 결과를 가용한 실험 결과^{11,12)}와 비교하여 용접 현상에 대한 차원 해석의 타당성을 검증하였다.

2. 차원 해석 방법

2.1 무차원수의 유도

차원 해석을 위하여 용융 금속은 축대칭의 비압축성 유체이며, 용접와이어의 물성치는 일정하다고 가정하였다. 아크의 항력 (drag force)에 의한 영향은 고려하지 않았고, 용융된 용접와이어 표면의 전류 밀도 분포는 Fig.1에 나타낸 바와 같이 모재에 가까워 질수록 선형적으로 증가하며, 용접와이어의 송급속도는 용융속도와 같은 정상상태로 가정하였다⁵⁾. GMA 용접의

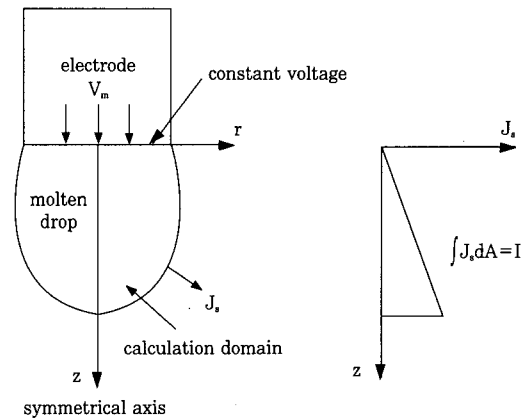


Fig. 1 Molten droplet geometry and current density distribution

금속이행 현상에서 용적의 크기, 이탈속도, 주파수 등과 같이 살펴 보고자 하는 물리량을 ϕ 라고 하면, ϕ 는 다음과 같은 관련 인자의 함수 형태로 표현할 수 있다.

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

이때, ρ 는 용융 금속의 밀도, μ 는 점성 계수, γ 는 표면장력, I 는 전류, μ_0 는 투자율 (permeability), g 는 중력, d_w 는 용접와이어의 직경, v_w 는 용접와이어의 송급속도를 나타낸다.

π 정리에 의하여 식(1)에 포함된 8개의 인자는 질량(M), 길이(L), 시간(T), 전하(Q)와 같이 독립된 4개의 차원을 가지므로 4개 이하의 독립된 무차원수를 갖는다. 관성력을 기준으로 식(1)에 정리를 적용하면 일반 유체역학에서 널리 사용되는 무차원수인 Reynolds, Weber, Froude 수가 유도되며, 관성력에 대한 전자기력의 비를 나타내는 새로운 무차원수인 N_{IE} 가 아래와 같이 유도된다.

$$Re = \frac{\rho v_w d_w}{\mu}, We = \frac{\rho d_w v_w^2}{\gamma}, Fr = \frac{v_w^2}{d_w g}, N_{IE} = \frac{\mu_0 I^2}{\rho v_w^2 d_w^2} \quad (2)$$

이때, I 와 E 는 각각 관성력과 전자기력을 의미한다.

일반적으로 금속이행에 영향을 미치는 힘으로 전자기력, 중력, 표면장력 등이며, 이 중에서 표면장력은 금속이행 전반에 영향을 미치며 기타의 힘과 달리 항시 유지력으로 작용하므로 표면장력을 차원 해석의 기준으로 무차원 수를 유도하는 것도 타당할 것으로 생각된다. 관성력 기준의 해석과 표면장력 기준의 해석 방법은 근본적으로 동일한 것이지만, 계산 결과를 분석하고 표현하는 방법에 차이가 있다. 표면장력을 기준으로 하여 차원 해석을 수행하면 아래의 식에 나타난 바와 같이 Weber와 Bond (Bo) 수, 표면장력에 대한

전자기력의 비를 나타내는 N_{SE} 와 표면장력에 대한 점성력의 비를 나타내는 N_{SV} 가 유도된다.

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

이때, N 의 첨자 S 와 V 는 각각 표면장력과 점성력을 의미한다.

관성력을 기준으로 한 경우와 표면장력을 기준으로 한 경우에 대하여 유도된 4개의 무차원수로 식 (1)을 정리하면 각각 다음과 같다.

$$\phi_0 = f(Re, We, Fr, N_{IE}) \quad (4)$$

$$\phi_0 = f(Bo, We, N_{SV}, N_{SE}) \quad (5)$$

이때, ϕ_0 는 무차원화 시킨 ϕ 이다. 위의 식과 식(1)을 비교하면, 차원 해석 방법을 적용하여 물리량 ϕ 또는 ϕ_0 에 영향을 미치는 인자의 수가 8개에서 4개로 감소됨을 알 수 있다.

가스 금속 아크 용접에서 이탈되는 용적의 크기와 주파수는 금속 이행의 형태를 결정하므로 매우 중요하다. 그러므로 본 연구에서는 이탈하는 용적의 부피를 구로 환산한 직경과 이탈속도를 관찰하고자 하는 물리량으로 선정하였으며, 아래와 같이 용접와이어의 직경과 송급속도를 이용하여 무차원화 시켰다.

$$D_0 = \frac{d_d}{d_w}, V_0 = \frac{v_d}{v_w} \quad (6)$$

이때, d_d 와 v_d 는 용적의 지름과 용적의 이탈속도를, 그리고 D_0 와 V_0 는 각각 무차원 용적의 직경과 무차원 이탈 속도를 나타낸다.

3. 결과 및 고찰

3.1 관성력 기준의 해석 결과

VOF법은 계산 영역을 셀로 나누고 각 셀에 포함된 유체의 부피 분율을 이용하여 자유 표면의 기울기 및 곡률을 계산하는 알고리즘이다. 즉 각 셀의 유체 부피 분율을 F 라 하면 F 는 유체내의 셀에서는 1, 유체를 포함하고 있지 않은 셀에서 0, 그리고 자유표면을 포함한 셀에서는 0과 1사이의 값을 갖게된다. 함수 F 의 변화가 가장 급격한 방향이 자유 표면의 수직 방향을 나타내므로, 자유표면의 형상을 계산할 수 있다. 자유 표면의 형상 및 압력등을 경계조건으로 하여 내부 유동장을 계산하며 속도의 변화에 따라 자유표면의 형상을 다시 계산하고 이 과정을 반복하면 동적 해석이

가능하다. 수치 해석 알고리즘 및 초기조건과 경계조건을 부가하는 방법은 기존의 연구⁵⁾와 동일하므로 생략하였다.

전자기력과 관성력의 비인 N_{IE} 를 독립 변수로 하고, Reynolds, Weber, Froude 수를 파라미터로 하여 이탈 용적의 크기와 속도를 계산하였다. 관성력을 기준으로 하는 식(4)의 무차원수의 범위는 다음과 같다: $287 < N_{IE} < 1560$, $Re = 50, 500, 5000$, $We = 0.025, 0.05, 0.1$, $Fr = 0.03125, 0.3125, 3.125$ 이다. 이때, N_{IE} 의 범위는 150A에서 350A까지의 용접전류에 해당하며, 다른 파라미터들은 직경 1.6mm인 강 용접와이어의 용접 조건을 기준으로 대략 0.1 - 0.5 배로부터 2 - 10 배까지의 범위에 해당한다.

기존 금속이행의 연구 결과는 대부분 정적 해석이므로 용융 금속의 점성이 미치는 영향을 고려하지 못하며^{12,13)}, 동적 해석에서도 점성의 영향은 아직 명확하게 알려지지 않고 있다^{5,6)}. 용접전류가 변화할 때 (즉, N_{IE} 가 변화할 때), 점성력이 용적의 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 Reynolds 수를 변화시키며 계산하여 Fig.2에 나타내었다. Reynolds 수가 크게 변화하여도 용적의 크기와 이탈속도의 변화

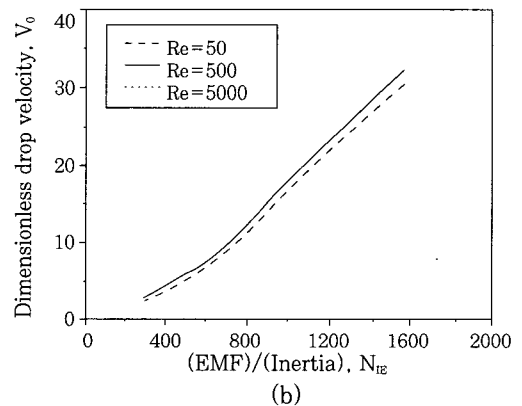
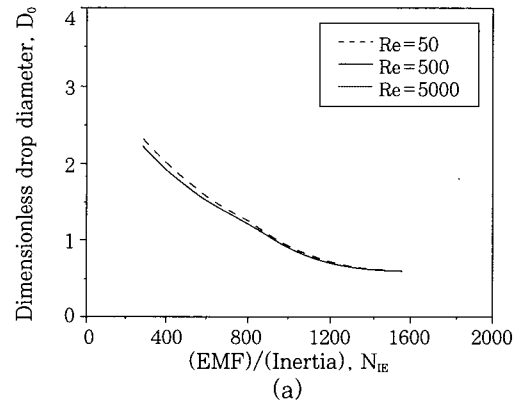


Fig. 2 Effects of Reynolds number on droplet size and detaching velocity ($We=0.05, Fr=0.3125$)

는 매우 작기 때문에 향후의 계산에서 점성력의 영향은 무시하였다.

저전류 영역 ($N_{IE}=287$)과 중전류 영역 ($N_{IE}=797$) 및 고전류 영역($N_{IE}=1560$)에서 Weber 수의 변화에 따른 용적의 형상을 VOF법으로 동적 해석하고 이탈되기 전의 형상을 Fig.3에 나타내었다. Fig.3(a)에서 Weber 수가 0.025로 작은 경우 (표면장력의 영향이 큰 경우), 증가된 표면장력은 용적의 유지력이 증가하므로 용적의 크기는 증가한다. Weber 수를 증가시키면, 표면장력의 영향은 상대적으로 감소하므로 용적의 이탈이 촉진되고 용적의 크기는 작아진다. 이와 같은 추세는 전류가 증가하는 Fig.3(b)와 3(c)에서도 유사하다. 그러나 고전류 영역에서 Weber 수가 증가하면 용적의 크기는 다소 감소하지만 저전류나 중전류 영역에 비하여 용적의 크기에 큰 변화는 나타나지 않는다.

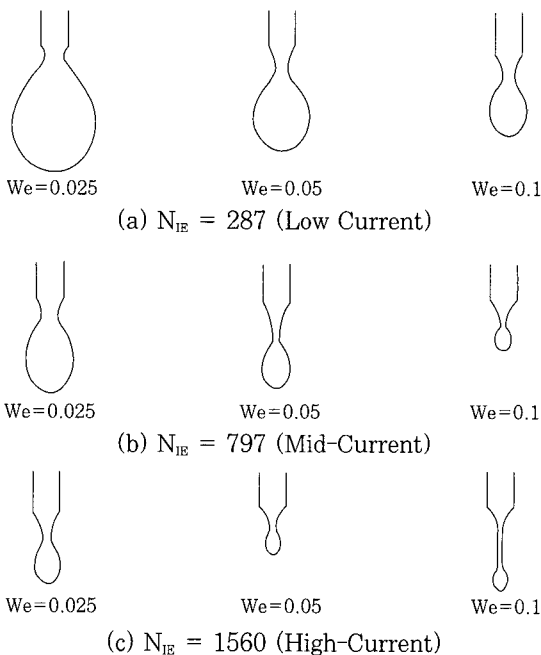


Fig. 3 Effects of Weber number on molten drop profile ($Fr=0.3125$)

Weber 수를 변화시킬 때 무차원화시킨 용적의 지름과 이탈속도를 Fig.4에 나타내었다. 이탈 용적의 크기는 전 영역에서 Weber 수의 영향을 받으며 (Fig.4(a)), 표면장력이 작을수록 (즉, Weber 수가 클수록) 용적의 크기가 작아진다. 그러나 고전류 영역에서 Weber 수가 증가하면 용적의 크기는 크게 변화하지 않는다. 그러므로 용적이 고전류 영역에서 발생하는 스프레이 모드로 이탈하면 용접전류가 증가하거나 표면장력이 감소하더라도 용적의 크기가 급격하게

작아지지 않는다. Weber 수가 증가하면 용적의 이탈 속도는 증가하며, 고전류 영역에서도 용적의 이탈속도는 증가한다 (Fig.4(b)). 스프레이 모드에서는 전류의 증가에 대해 용적의 크기가 급격하게 감소하지 않으므로, 전류의 증가에 따른 용융 속도의 증가는 용적의 이탈 주파수 및 이탈 속도의 증가에 영향을 준다.

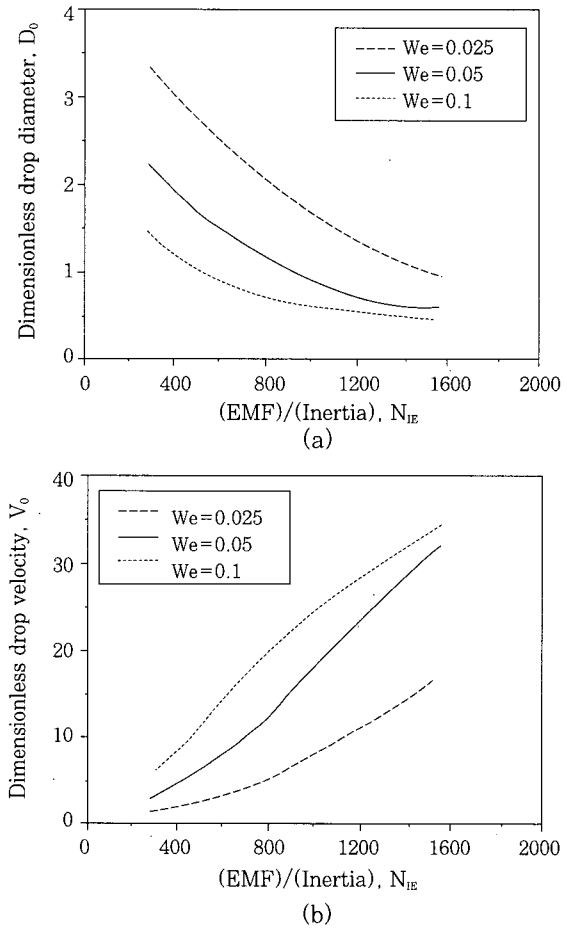


Fig. 4 Effects of Weber number on droplet size and detaching velocity ($Re=500, Fr=0.3125$)

중력은 위보기 자세로 용접하는 경우를 제외하면 용적의 이탈력으로 작용하며, 차원 해석에서 중력의 영향은 Froude 수로 나타낸다. Weber 수를 0.05로 고정하였을 때 Froude 수의 변화에 따른 용적의 형상을 Fig.5에 나타내었다. Froude 수가 작은 경우 (즉, 중력의 영향이 큰 경우), 용적의 이탈력이 증가하므로 용적의 크기는 감소한다. Froude 수의 영향은 Fig.5(a)의 저전류 영역에서 현저하게 나타나며, 전류가 증가하면 Fig.5(b)와 5(c)에 나타난 바와 같이 용적의 크기에 큰 변화가 없다.

Froude 수가 용적 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.6에 나타내었다. 중력은 저전류 영역에서 용적

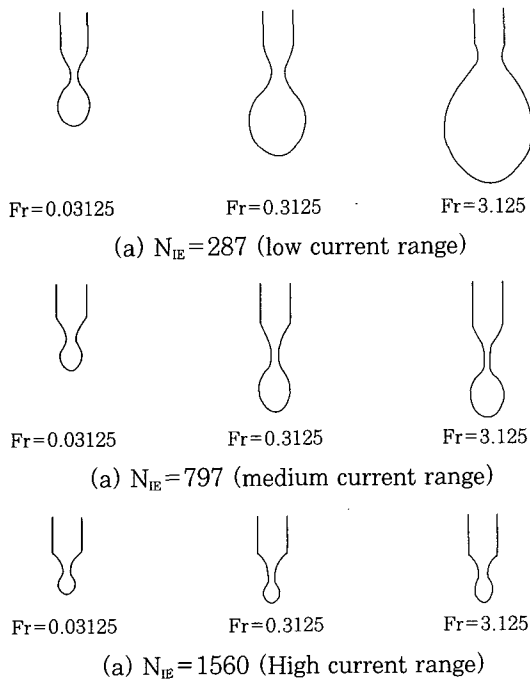


Fig. 5 Effects of Froude number on droplet profile ($We=0.05$)

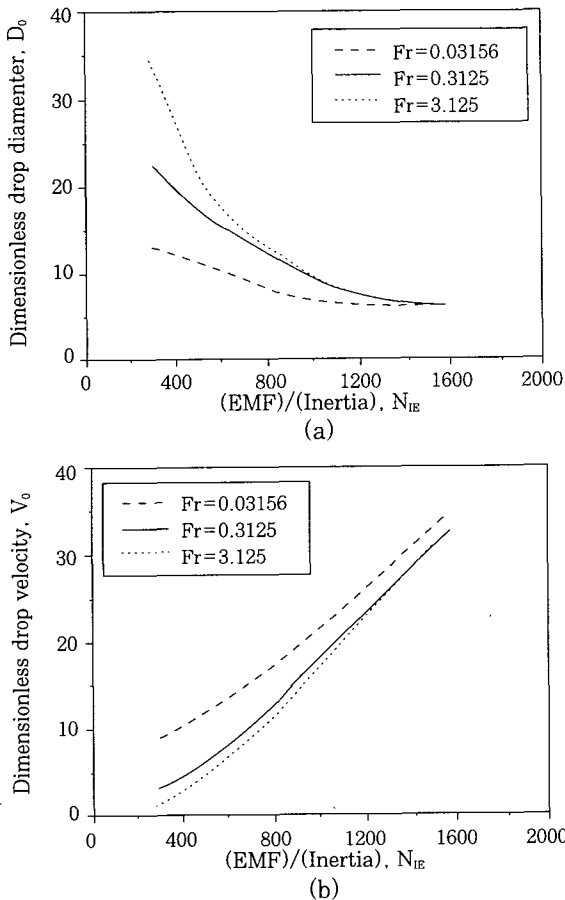


Fig. 6 Effects of Froude number on droplet size and detaching velocity ($Re=500, We=0.05$)

의 부피가 증가하므로 금속이행에 영향을 크게 미치지 만, 고전류 영역에서는 큰 영향을 주지 못하며 용적의 이탈속도도 저전류 영역에서만 변화한다. 그러므로 입 상용적 모드에서는 중력의 영향이 크고, 스프레이 모 드에서는 중력의 영향이 무시할 수 있을 정도로 작아 진다. Weber 수와 Froude 수가 금속이행에 미치는 영향을 비교하면 (즉, 표면장력과 중력의 영향), Weber 수는 저전류 영역에서 고전류 영역까지 대부 분의 영역에서 금속이행에 영향을 미치며, Froude 수는 주로 용적의 부피가 증가하는 저전류 영역에서만 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.2 표면장력 기준의 해석 결과

앞절에서 분석한 결과로부터 표면장력은 모든 전류 영역에서 금속이행에 영향을 미치는 중요한 인자이며 용적의 이탈을 저해하는 유지력으로 작용하므로, 표면 장력을 기준으로 하여 차원 해석을 수행하여 이탈력인 전자기력과 중력에 대한 상대적인 영향을 분석하였다. 전자기력과 표면장력의 비인 N_{SE} 를 독립 변수로 하고, Weber 수와 Bond 수를 파라미터로 하여 이탈 용적 의 크기와 속도를 계산하였다. 표면장력을 기준으로 하는 식(5)의 무차원수의 범위는 다음과 같다: $15 < N_{SE} < 90, 0.025 < We < 0.25, 0.04 < Bo < 0.32$ 이다. 이와 같은 범위는 직경 1.6mm인 강 용접와이 어를 사용하는 경우, 153A-376A까지의 용접전류 값 에 해당하며, 일반적인 용접 조건의 0.1-0.5 배 로부터 2-10배까지의 범위에 해당한다. 점성력은 Fig.2에서 보인 바와 같이 금속이행에 큰 영향을 주지 못하므로 해석에서 제외하였다.

Bond 수를 0.16으로 고정한 경우, Weber 수가 용 적의 지름과 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.7에 나타 내었다. 이때의 Weber 수는 표면장력을 기준으로 하였으므로 관성력을 기준으로 한 Fig.4의 경우와 달리 용접와이어 송급속도가 금속이행에 미치는 영향을 나 타낸다. Weber 수가 증가하면 (즉, 용접와이어의 송 급속도가 증가하면), 이탈 용적의 크기가 증가하며, 특히 N_{SE} 가 40이상인 고전류 영역에서 그 영향이 증 가한다 (Fig.7(a)). 고전류 영역에서는 송급속도가 빠 르면 용적의 부피가 커지므로 용융부에 작용하는 전류 밀도는 작아지고 단위 부피 당 전자기력이 감소하기 때문에 용적이 더 크게 성장하는 것으로 추정된다. 전 류에 따라 용접와이어 송급속도는 용적의 이탈속도에 크게 영향을 미친다 (Fig.7(b)). N_{SE} 가 25이하인 저 전류 영역에서는 송급속도가 변화할 때 용적의 이탈속

도는 거의 변화하지 않지만, N_{SE} 가 30이상으로 증가하면 송급속도가 큰 경우의 용적 이탈속도는 송급속도가 작은 경우보다 낮아진다. 이는 유체가 다량으로 공급되면 용융부의 부피가 커져서 용융부의 전류 밀도가 작아지고 용적도 커지기 때문에 단위 부피 당 전자기력이 작아지기 때문이다. 본 연구에서 용접와이어의 송급속도와 용융속도를 동일한 정상상태로 가정하였으므로 계산의 입력으로 고전류 영역에서 용접와이어 송급속도를 낮게 설정하는 (즉, 낮은 용융속도) 등의 실제 용접조건과 다른 경우도 포함하고 있다. 그러므로 송급속도의 영향을 정확하게 분석하려면 열 영향을 포함한 동적 해석을 수행하는 것이 필요하다.

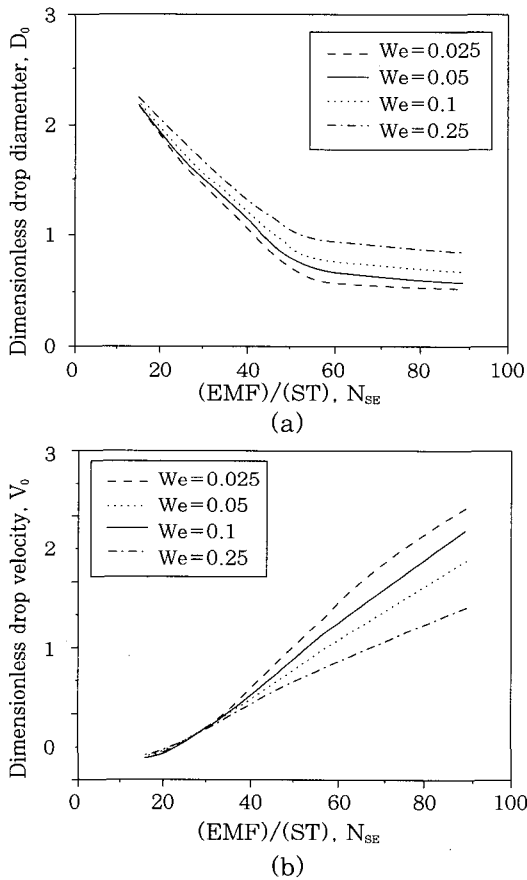


Fig. 7 Effects of Weber number on droplet size and detaching velocity ($Bo=0.16$)

Weber 수를 0.05로 고정시킨 경우에 중력의 영향을 나타내는 Bond 수가 이탈 용적의 크기와 이탈속도에 미치는 영향을 Fig.8에 나타내었다. Bond 수가 용적의 크기와 이탈속도에 미치는 영향은 N_{SE} 가 40이하의 저전류 영역에서 현저하게 나타나지만, 전류가 증가하면 크게 영향을 미치지 못한다. 이와 같은 경향은 중력이 입상용적 이행 모드에서 큰 영향을 미친다는 Fig.6의 결과와 유사하다. Fig.7과 8에 나타난 바와

같이, 금속이행 모드의 특성을 분석 하는데 가장 유용한 무차원수는 전자기력과 표면장력의 비로 표현되는 N_{SE} 이며, 표면장력을 기준으로한 차원 해석은 관성력을 기준으로 하는 차원 해석 방법보다 효과적이다.

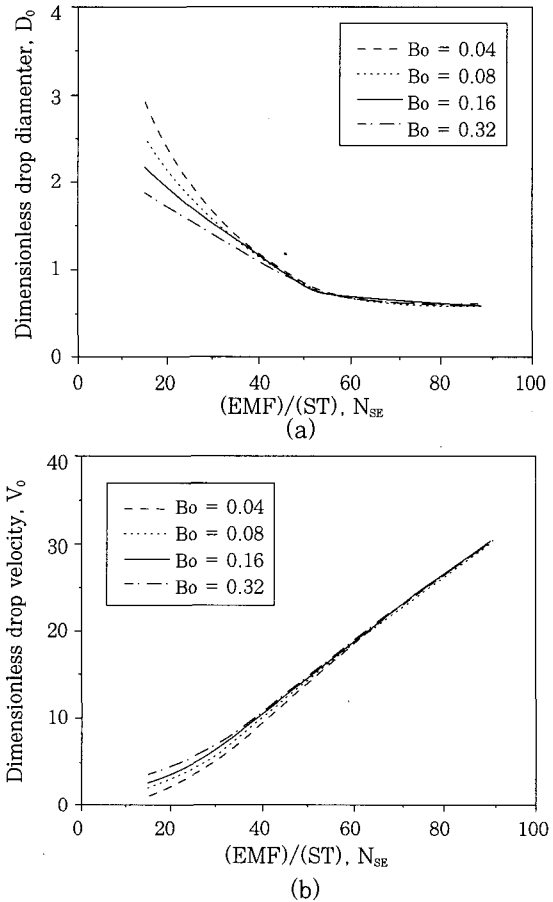


Fig. 8 Effects of Bond number on droplet size and detaching velocity ($We = 0.05$)

3.3 천이 전류의 예측

표면장력을 기준으로 차원 해석을 수행한 결과, Weber나 Bond 수의 영향에 따라 다소 변화하지만 N_{SE} 가 40에서 50사이에서 용적과 용접와이어의 직경과 비슷하므로 프로젝트 모드를 포함하는 천이 구간이라고 할 수 있으며, 이 구간에서 용적의 이탈속도는 용접 와이어 송급속도의 10-20배 정도이다 (Fig.7,8). 입상용적 모드는 대략 N_{SE} 가 40이하에서, 스트리밍 모드는 대략 N_{SE} 가 50이상에서 발생하며, N_{SE} 의 변화에 따른 금속이행 모드를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 N_{SE} < 40, & \quad \text{globular mode} \\
 40 < N_{SE} < 50, & \quad \text{transition including projected mode} \\
 N_{SE} > 50, & \quad \text{streaming mode}
 \end{aligned} \tag{7}$$

실제 용접 공정에서 사용하는 용접 전류, 용접와이어의 직경 및 표면장력 계수로부터 N_{SE} 의 값을 계산하여 금속이행 모드를 예측할 수 있으며, 천이 전류의 범위는 아래와 같다.

$$\sqrt{\frac{40 d_w \gamma}{\mu_0}} \leq I_t \leq \sqrt{\frac{50 d_w \gamma}{\mu_0}} \quad (8)$$

강 및 알루미늄의 표면장력 계수를 각각 1.2N/m, 0.7N/m이라 하고¹⁵⁾, 식 (8)을 이용하여 용접와이어 직경에 대한 천이 전류의 범위를 계산한 결과와 기존의 이론^{16,17)}을 이용하여 구한 천이 전류를 비교하여 Fig.9에 나타내었다. 천이 전류의 전반적인 추세는 용접와이어 직경의 제곱근(square root)에 비례한다. 직경 1.6mm 강 용접와이어의 경우, 식(8)로 계산한 천이 구간은 247-276A이고 기존 이론에 의해 계산한 천이 전류는 235A¹⁶⁾, 246A¹⁷⁾이다. 직경 1.2mm 강 용접와이어의 경우, 식(8)로 계산한 천이 구간은 214-239A이고 기존 이론에 의한 천이 전류는 203A, 213A이므로 식(8)의 하한값과 대략 일치한다. 직경 1.6mm인 알루미늄 용접와이어의 경우, 식(8)의 천이 구간은 164-182A 이며 기존 이론에 의한 천이 전류는 156A, 162A이므로, 강 용접와이어와 유사하게 천이 구간의 하한값과 일치한다. 이와같이 식(8)의 하한값과 기존의 천이 전류가 일치하는 이유는 식(8)의 구간이 프로젝트 모드를 포함하고 있기 때문이다.

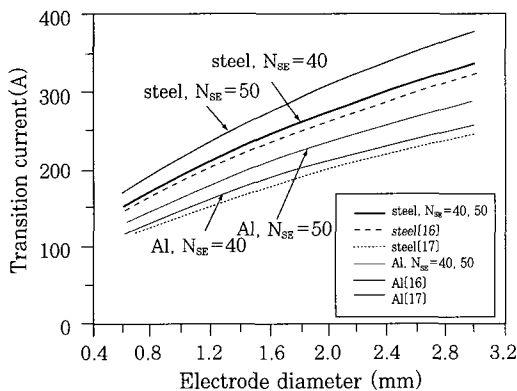


Fig. 9 Comparison between calculated ranges of transition current

3.4 실험 결과와의 비교

강 및 알루미늄의 천이 전류를 계산하여 실험 결과^{11,12)}와 비교한 결과를 Fig.10에 나타내었다. 강 용접와이어의 경우 ($\gamma=1.2N/m$), 실험으로 측정된 천이 전류는 식(8)에서 제안한 천이 구간 내에 존재하였다.

알루미늄 용접와이어의 경우 ($\gamma=0.7N/m$), 실험 결과는 계산된 천이 전류의 하한값보다 약간 낮게 나타나지만 일반적인 추세는 일치하였다. 그러므로 용접와이어의 직경이나 재질이 변화하여도 식(8)을 이용하여 천이 전류를 비교적 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

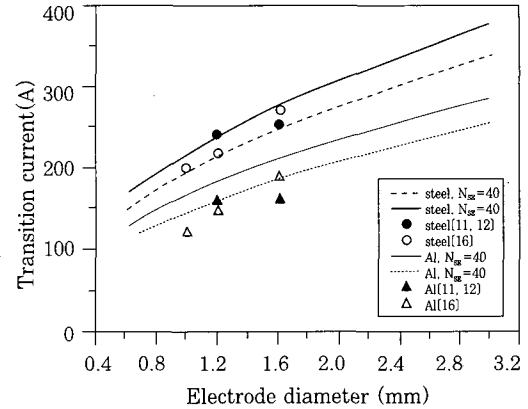


Fig. 10 Comparison between calculated and experimental transition current

천이 전류를 포함하는 일반적인 금속이행 현상을 예측하려면 타당한 용융 금속의 물성치를 선정하여야 하며, 특히 표면장력 계수는 계산 결과에 큰 영향을 미친다. 강 용접와이어의 경우 표면장력 계수는 온도에 따라 1.2에서 1.8N/m사이의 값을 갖는 것으로 알려져 있다. 기존의 연구에서 저전류 영역에서 발생하는 입상용적 모드에서는 용적의 온도가 낮으므로 1.8N/m의 표면장력 계수를 사용하고, 고전류 영역에서 발생하는 스프레이 모드에서는 용적의 온도가 높으므로 1.2N/m의 표면장력 계수를 사용하면 실험 결과와 잘 일치하는 것을 보인 바 있다⁵⁾. 그러므로 본 연구에서는 강의 표면장력 계수로서 1.2와 1.8N/m를 사용하여 실험결과를 무차원화시켜 분석하고 차원 해석 결과와 비교하였다. 실제 용접조건으로 부터 Weber 수와 Bond 수를 계산하여 금속이행에 미치는 영향을 Fig.11의 실험 결과를 이용하여 분석하였다. 실험으로 측정된 용적의 지름을 무차원화시킨 결과, Fig.11에 나타난 바와 같이 용접와이어의 직경에 다소 영향을 받지만 무차원수 N_{SE} 에 따라 유사한 추세로 수렴되어 분포되었다. 강의 표면장력 계수를 1.2N/m로 설정하는 경우 (Fig.11(a)), 직경 1.2mm인 용접와이어 송급속도의 범위가 4-12cm/s¹²⁾라면 Weber 수의 범위는 0.013-0.11이며, Bond 수는 0.09 이다. 직경 1.6mm인 용접와이어 송급속도의 범위가 3.8-8.5cm/s라면, Weber 수의 범위는 0.015-0.076이

고, Bond 수는 0.16이다. 저전류 영역에서는 직경 1.2mm인 용접와이어의 Bond 수가 작으므로 무차원 용적 지름은 직경 1.6mm의 용접와이어를 사용할 때의 실험 결과보다 다소 크게 된다. 전류를 증가시키면 Bond 수의 영향은 감소하지만, 직경 1.2mm인 용접와이어의 Weber 수가 크기 때문에 측정된 용적의 지름은 직경 1.6mm인 용접와이어의 실험 결과보다 크게 된다. 이와 같은 추세는 강의 표면장력 계수를 1.8N/m로 설정하는 경우의 실험 결과에서도 동일하다 (Fig.11(b)). 전반적으로 직경 1.2mm인 용접와이어를 사용하는 경우에 무차원 용적 지름이 크게 나타났다며 저전류 영역에서는 1.2mm와 1.6mm가 비슷하게 나타났다.

전류 영역보다 저전류 영역에서 차이가 발생한다. 강의 표면장력 계수로 1.8N/m를 사용하는 경우 (Fig.11(b)), Bond 수가 직경 1.2와 1.6mm인 용접와이어에 대하여 0.08과 0.14이므로 저전류 영역에서 계산 결과와 실험 결과가 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 실험 결과와 비교적 잘 일치한다고 할 수 있다.

4. 결 론

차원 해석을 이용하여 GMA 용접의 금속이행 현상을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 차원 해석 방법을 적용하여 금속이행에 영향을 미치는 인자의 수를 4개의 무차원수로 나타내었으며, 각각의 무차원수의 영향을 VOF법을 이용하여 동적 해석하였다.
- (2) 금속이행에 영향을 미치는 힘 중에서 점성력의 영향은 무시할 수 있을 정도로 작았으며, 중력의 영향을 나타내는 Bond 수는 저전류 영역에서는 큰 영향을 미치지만 고전류 영역에서는 영향이 크게 감소한다. 용접와이어 송급속도 혹은 용융속도를 나타내는 Weber 수가 저전류 영역에서 보다 고전류 영역에서 큰 영향을 미치며, Weber 수가 증가할수록 용적의 크기는 증가하고 이탈속도는 감소하였다.
- (3) 금속이행에 큰 영향을 미치며 금속이행 모드의 특성을 분석하는데 가장 유용한 무차원수는 전자기력과 표면장력의 비로 표현되는 N_{SE} 이다. 차원 해석 결과로 추정되는 천이 구간은 $40 < N_{SE} < 50$ 이며, 강과 알루미늄 용접와이어의 직경이 변화하여도 천이 전류값을 상당히 정확하게 예측하였다. 강 용접와이어의 경우, 차원 해석 결과는 실험 결과를 비교적 정확하게 예측하였으며, 표면장력 계수가 금속이행 해석에 큰 영향을 미친다.

후 기

본 연구는 한국과학기술재단의 핵심전문연구를 통하여 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

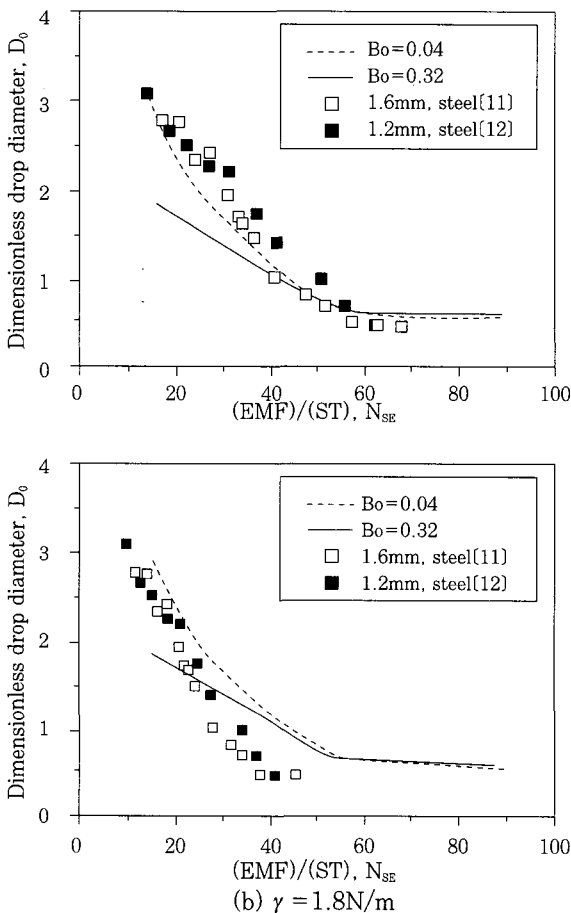


Fig. 11 Comparison between calculated and experimental drop diameter

Fig.11에서 강의 표면장력 계수로 1.2N/m를 사용하면 (Fig.11(a)), 스프레이 모드가 발생하는 고전류 영역에서 계산 결과와 실험 결과는 비교적 일치하는 경향을 보이고 있다. Bond 수가 용접와이어 직경 1.2와 1.6mm에 따라 0.09와 0.16임을 고려하면, 고전류 영역에서 계산 결과와 실험 결과는 잘 일치하며, 고

참 고 문 헌

1. F. H. Harlow and J. E. Welch : Numerical calculation of time dependent viscous incompressible flow of fluid with free surface, *The Physics of Fluids*, Vol.8(12), (1965), pp.2182-2189
2. C. W. Hirt and B. D. Nichols : Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries, *J. of Computational Physics*, Vol.39, (1981), pp.201-225
3. H. Maruo, Y. Hirata and N. Goto : Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop, *Quarterly J. of JWS*, Vol.10(2), (1992), pp.251-258
4. J. Haidar and J. J. Lowke : Predictions of metal droplet formation in arc welding, *J. of Physics D: Applied Physics*, Vol.29, (1996), pp.1951-2960
5. 최상균, 유중돈, 김용석 : GMAW의 금속이행 현상에 관한 동적해석 Part1-입상용적 및 스프레이 모드, *대한용접학회지*, 제15권 3호, (1997), pp.168-178
6. 최상균, 유중돈, 박상규 : Pulsed-GMAW의 금속이행 현상에 관한 동적해석, *대한용접학회지*, 제15권 5호, (1997), pp.459-465
7. P. R. Heald, R. B. Madigan, T. A. Siewert, S. Liu : Mapping the droplet transfer modes for an ER100S-1 GMAW electrode, *Welding Journal*, Vol.73(2), (1994), pp.38s-44s.
8. J. H. Waszink, M. J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, *Welding Journal*, Vol.65(11), (1986), pp.289s-298s.
9. F. M. White, *Fluid Mechanics*, 2nd Ed. (1986), McGraw-Hill
10. Y.-S. Kim, D. M. McEligot, T. W. Eagar : Analyses of electrode heat transfer in GMAW, *Welding Journal*, Vol.70(1), (1991), pp.20s-31s.
11. Y.-S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, (1989), Ph.D. Thesis, M.I.T
12. 최상균 : GMAW의 금속이행 현상에 관한 동적해석, (1998), 박사학위 논문, 한국과학기술원 기계공학과
13. J. C. Amson : An analysis of the gas-shielded consumable metal arc welding system, *British Welding Journal*, Vol.41(4), (1962), pp.232-249
14. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability : I. Varicose instability in a current-carrying liquid cylinder with surface charge, *J. of Physics D: Applied Physics*, Vol. 18, (1985), pp.1447-1468
15. J. F. Lancaster : *Metallurgy of welding*, 5th Ed., (1993), Chapman & Hall
16. C. J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability : II. Development of model for arc welding, *J. of Physics D: Applied Physics*, Vol. 18, (1985), pp.1447-1468
17. J. J. Lowke : Simple model for the transition current from globular to spray transfer in gas metal arc welding, *International Welding and Joining Research Conference*, (1997), Melbourne Univ., Australia