

GMA 용접의 금속이행 현상에 관한 이론 해석 방법

최상균·유중돈

Theoretical Methods to Analyze Metal Transfer in GMA Welding

Sang K. Choi and Choong D. Yoo



최상균/영남대학교/
1965년생/용접공정
모델링 및 공정 자동
화



유중돈/한국과학기술
원/1956년생/용접 및
패키징 공정 모델링
및 계측

1. 서 론

금속이행은 SAW, SMAW, GMAW, FCAW 등의 소모성 용접봉을 사용하는 아크용접 공정에서 저항열과 아크열에 의해 용융된 용접봉 끝 부분의 용적이 아크를 통과하여 모재로 이행하는 현상을 말하며, 아크 용접공정의 생산성과 용접부의 품질에 큰 영향을 미친다. 금속이행 현상은 용접봉의 재질, 플럭스의 성분과 분위기 가스, 용접전류 등에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있지만, 이와 같은 인자들은 상호 연계되어 있으므로 관련 인자들을 모두 고려하여 금속이행 현상을 이론적으로 해석하는 것은 거의 불가능하다. 이론적 해석의 어려움으로 인하여 실험에 의한 금속이행에 관한 연구가 널리 수행되었으며, 주로 용접전류와 전압 또는 고속 카메라를 이용하여 용적의 이탈현상을 관찰하는 연구들이 수행되었다. 그러나 실험을 통하여 용접 내부에서 발생하는 속도나 압력 분포 등을 측정하는 것이 어렵기 때문에 실험과 더불어 단순화시킨 모델이나 수치해석 기법을 이용한 이론적 연구가 활발히 진행되어 왔다.

GMA 용접의 금속이행은 주로 용접전류와 분위

기 가스에 의하여 영향을 받으며, Fig. 1에 나타낸 바와 같이 용접조건에 따라 단락이행 (short-circuit), 입상용적 (globular), 스프레이 (spray), 회전 (rotating) 모드 등으로 분류된다¹⁾. 스프레이 모드는 분위기 가스가 아르곤 또는 CO₂ 가스가 20% 이하로 혼합된 아르곤 가스를 사용하는 경우에만 발생한다. 그러므로 헬륨 가스를 사용하거나, 국내에서 주로 사용되는 CO₂ 아크 용접인 경우에는 스프레이 모드로 용접할 수 없다. 헬륨이나 CO₂ 가스를 사용하는 경우에 스프레이 모드가 발생하지 않는 원인은 정확하게 규명되어 있지 않지만, 아크가 용적의 밑부분에 집중되는 것으로 관찰되었고, 이는 헬륨 가스의 이온화 에너지가 높고 열전도도가 아르곤 가스에 비하여 크기 때문에 용접전류가 증가하여도 스프레이 모드가 발생하지 못하는 것으로 추정되었다. 그러나 이는 실험적으로 관찰한 결과로부터 유추한 것으로서 해석적인 방법으로 이를 입증한 연구는 현재까지 알려져 있지 않다. 그러므로 금속이행의 해석은 비교적 단순한 모델이 널리 사용되고 있으며, 최근 수치해석 방법이 적용되는 추세이다.

본 편에서는 GMA 용접에서 발생하는 금속이행

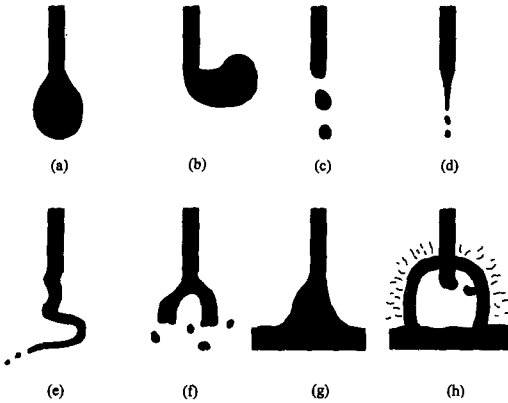


Fig. 1 Metal transfer modes according to the IIV classification
 (a) Drop mode (b) Repelled (c) Projected
 (d) Streaming (e) Rotating (f) Explosive
 (g) Short-circuiting (h) Flux-wall-guided

중에서 입상용적 이행에 가장 널리 사용되는 힘평형 모델(static force balance model)과 스프레이 이행에 사용되는 pinch instability 이론, 용융부의 형상을 고려한 해석 및 자유표면을 고려한 동적 해석에 관하여 설명하고, 이론적 해석 방법을 이용한 응용 및 향후 연구 과제에 관하여 기술하고자 한다.

2. 힘평형 모델과 pinch instability 이론

힘평형 모델^{2,3)}과 pinch instability 이론^{1,4)}은 근본적으로 정적 해석이며, 각각 입상용적과 스프레이 이행 모드에서 용접전류에 대하여 용적의 크기와 이탈 주기 등이 간단하게 계산되므로 널리 사용되고 있다. 힘평형 모델은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 용적의 축방향으로 작용하는 힘의 성분을 중력과 항력 등에 의한 이탈력과 표면장력에 의한 유지력으로 구분하여 이탈력이 유지력보다 크게 되면 용적이 이탈하게 된다. 힘평형 모델은 아래와 같은 간단한 식으로 표현이 가능하다.

$$F = F_{emf} + F_g + F_d - F_s \quad (1)$$

이때, F_{emf} , F_g , F_d , F_s 는 각각 전자기력, 중력, 항력, 표면장력을 나타내고, F 는 용적을 이탈시키려는 힘들의 합력으로서, 만일 이탈력이 유지력

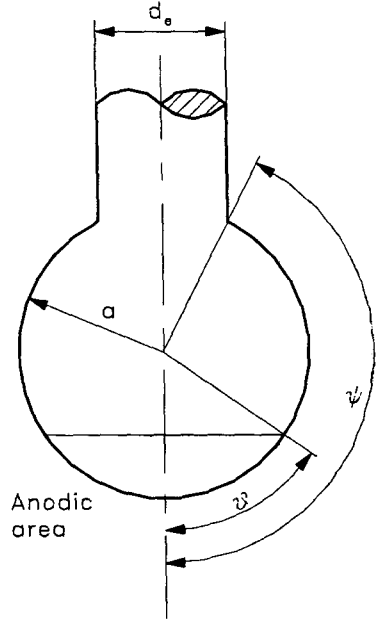


Fig. 2 Assumed geometry of a drop for calculation of static forces

보다 크다면 ($F > 0$), 용적이 이탈하는 것으로 판단한다. 힘평형 모델은 용적이 구형인 경우에 대하여 closed-form의 해가 존재하기 때문에 널리 사용되고 있지만, 실제로는 구보다 더 복잡한 축대칭 형상인 경우에도 수치적인 방법을 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 힘평형 모델은 반경 방향의 펀치 효과를 고려할 수 없으며, 축대칭인 용적의 형상이 주어져야 한다. 용적이 구형인 경우에, 용접전류에 의한 전자기력은 아크의 분포에 따라 이탈력 또는 유지력으로 작용되며 다음과 같은 식으로 표현이 가능하다²⁾.

$$F_{emf} = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi} \left\{ \ln \frac{2a \sin \theta}{d_e} - \frac{1}{4} - \frac{1}{1 - \cos \theta} + \frac{2}{(1 - \cos \theta)^2} \ln \frac{2}{(1 + \cos \theta)} \right\} \quad (2)$$

이때, θ 는 Fig. 2와 같이 아크가 용적을 덮인 부분을 나타낸다.

Pinch instability 이론은 Fig. 3과 같은 액체 기둥(liquid column)에서 그 길이가 일정한 값 이상으로

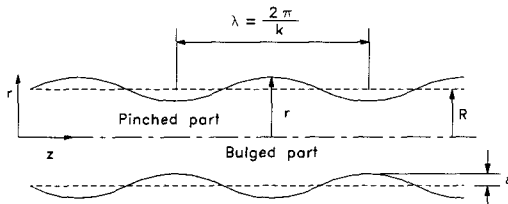


Fig. 3 Geometry of a liquid column with axial disturbance

커지게 되면 작은 외란 (disturbance)에 의해서도 내부 압력의 분포가 불안정하게 되는 조건을 금속이행에 적용하였다. 전류가 흐르고 있을 때의 임계 파장 λ_c 는 다음과 같이 표현된다¹⁾.

$$\lambda_c = \frac{2\pi R}{\sqrt{1 + \frac{\mu_0 J^2}{2\pi^2 R \gamma}}} \quad (3)$$

이때, γ 는 표면장력을 나타낸다. 위 식에서 용융부의 길이가 λ_c 보다 커지게 되면 용융부 내에 instability가 발생하여 용적이 이탈되는 것으로 간주한다. Pinch instability 이론은 용적의 형상을 미리 원통형으로 가정하였으며, 원통의 표면을 통하여 아크로 흐르는 전류의 효과를 고려할 수 없는 단점이 있다. 직경이 1.6mm인 강 용접봉에 대하여 힘평형 모델과 pinch instability이론을 이용하여 용접전류에 대한 이탈 용적의 크기를 계산하고 실험 결과⁵⁾와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과와 비교하여 입상 용적 모드에서는 힘평형 모델이, 그리고 스프레이 이행 모드에서는 pinch instability 이론이 적용 가능하지만, 실험결과와 상당한 차이를 보인다. 이는 두 모델의 가정이 실제와 상당히 상이하기 때문인 것으로 추정된다.

앞에서 언급한 힘평형 모델과 pinch instability이론이 용적의 형상을 가정하여 용적의 이탈조건을 계산하는데 반하여 최근 용적에 작용하는 에너지를 계산하여 이를 최소화하는 형상을 계산하여 입상 용적 이행과 스프레이 이행을 해석하려는 시도^{6,7)}와 곡률에 의한 압력 변화와 전자기력의 영향을 함께 고려하여 형상을 계산한 연구⁸⁾가 있었다. 용융부의 부피에 대하여 용적에 작용하는 에너지가 최소화되는 형상을 계산하고 이를 Fig. 5에 나타내었다. 이

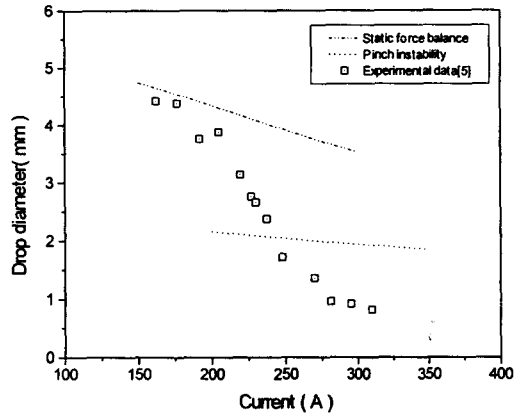


Fig. 4 Comparison of force balance and pinch instability with experimental data

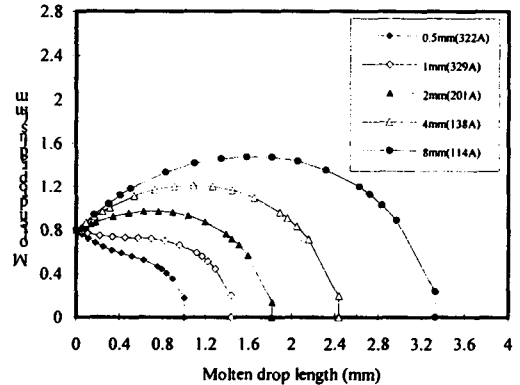


Fig. 5 Molten drop shapes for various initial length by energy minimization

연구들은 용접전류에 따른 용융부 형상을 계산할 수 있고 입상용적과 스프레이 모드에 적용이 가능하지만, 정적 해석이므로 용융부의 속도 분포나 전류 분포에 대해 예측을 할 수 없다는 단점이 있으며 계산 결과는 힘평형 모델이나 pinch instability 이론과 비교하여 큰 차이가 없다.

3. 자유표면을 포함한 동적 해석 방법

Cram⁹⁾은 용융부의 형상을 미리 가정하고 곡률에 의한 축방향의 압력 변화를 이용하여 용융부의 형상 변화를 동적 해석한 바 있다. 이 연구에서는 전자기력의 영향이 고려되지 않았고 압력 분포를

1차원으로 가정하였으므로 실제 용접 현상과는 다소 차이가 있다. 후에 Simpson¹⁰⁾은 압력 분포를 2차원으로 하고 전자기력을 고려하여 해석하였지만, 초기 형상을 길게 녹아 있는 실린더로 미리 가정하여 용적의 형성을 추적하였으므로 해석 결과를 실제 용접에는 적용하기 어렵다.

최근 들어 컴퓨터 성능의 향상과 더불어 전산 유체 역학 분야에서 사용되는 자유 표면 기술 기법을 도입한 수치적 연구가 활발하게 진행되고 있다. 자유 표면 기술 기법으로서 가장 널리 사용되는 방법은 MAC(Marker and Cell)과 VOF(Volume of Fluid) 방법이다. MAC 방법¹¹⁾은 유체가 존재하는 구역에 마커(기억 요소)를 설정하고 유체의 속도에 따라 마커를 이동시킴으로써 자유 표면의 정보를 얻는 방법이다. 원리는 비교적 간단하지만 사용 메모리의 양이 크고 반복 계산 단계에서 마커의 재정렬해야 하는 어려움이 있다. VOF 방법¹²⁾은 이를 해결하기 위하여 MAC법에서의 마커의 역할을 부피 분율을 나타내는 함수 F로 대체하여 메모리의 사용량도 줄이고 자유표면의 표현도 효과적으로 할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 첨예한 자유 표면을 가진 유동에 대해서는 VOF법을 사용하게 되면 averaging 효과 때문에 제대로 표현하지 못하는 경우가 발생할 수 있다.

Maruo 등¹³⁾은 MAC방법을 이용하여 자유표면을 고려한 단락이행의 동적 해석을 수행하였다. 단락 이행시 시간에 따른 단락 형상과 유속 등의 변화를 수치적으로 계산하였으며 수은을 이용한 실험 결과와 비교해 본 결과 상당히 일치하였다. 이 연구는 열해석을 포함하지 않았고 용적이 용융 풀의 표면에 접촉한 이후부터 해석을 수행하였으므로 아크의 영향을 고려할 필요가 없지만 실제의 금속이행 현상과는 차이가 있다. 또한, 전자기력을 고려하기 위한 경계 조건으로서 자속 밀도를 사용하여 전류 분포를 정확하게 예측할 수 없고 복잡한 단락과 용융풀의 자유 표면 형상에 적용하는데 어려움이 있다.

입상용적 및 스프레이 영역에 대해서는 VOF법을 이용한 동적 해석이 수행되었다^{14,15)}. Haidar¹⁴⁾의 해석은 동적 해석과 함께 열 해석을 수행하며 해석 영역은 용적과 아크 및 모재를 포함하므로 전반적인 추세와 함께 아크의 영향을 알 수 있다. 그러나 해석 영역이 너무 광범위하고, 각 영역에서의 특성 또한 자세히 알려져 있지 않으므로 경계조건이

모호하여 용적의 형상이 실제의 실험결과와 상이하게 되는 등의 단점도 있다. 최상균¹⁵⁾은 계산 영역을 용융부에 국한한 반면 용융부 표면에서의 전류 밀도를 균일하게 분포되어 있는 경우와 선형적으로 변화하는 경우로 가정하고 이를 경계조건으로 하여 아크의 효과를 고려하였다. 이 연구에서는 열해석이 포함되어 있지 않으며 아크의 영향을 직접 고려할 수 없지만, 용적 표면의 전류밀도를 합리적으로 가정하여 실제 현상과 유사한 조건을 simulation할 수 있다.

VOF 방법을 이용하여 직경 1.6mm인 강 용접봉이고 용접전류가 150A, 송급 속도가 70mm/s, 용융부 표면에서의 전류 분포를 선형적으로 가정한 경우에 대하여, 시간에 따른 용적 형상의 변화와 이탈 직전 유속의 분포를 Fig. 6과 Fig. 7에 나타내었다. 매 주기에 따라 이탈후의 형상이나 속도 차이로 인하여 약간의 차이가 발생하지만 용적의 이탈 주기는 대략 190msec이고 용적의 지름은 3.55mm로서 용적의 지름이 용접봉 직경보다 커지는 입상 용적 모드를 나타낸다. 용적이 이탈하기 직전에 테이퍼가 발생하지만 용적이 이탈한 후에는 테이퍼가 유지되지 못하고 용융부는 구형으로 복원되고 계속 성장한다. 용적 내부의 유속은 축방향으로 내려오다가 아래면에서 반시계 방향으로 회전하며, 용적이 이탈되기 전 용융부 내의 최대 속도는 대략 0.5m/s이었다. 용접전류를 300A로 증가시키면 Fig. 8에 나타난 바와 같이 금속이행 현상은 스프레이 모드를 나타내며 이때 이탈되는 용적의 평균 직경은 1.2mm이었다. 전류가 증가할수록 용적의 이탈속도는 증가하고 이탈주기는 감소하며

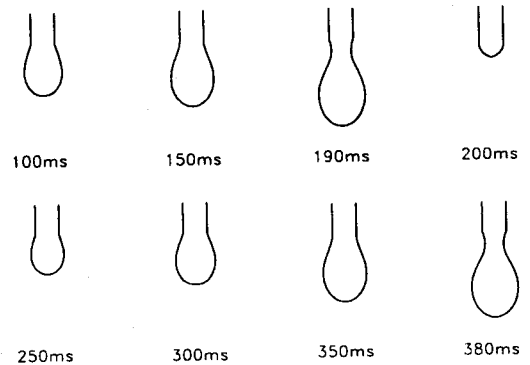


Fig. 6 Change of molten drop profile at 150A (linear current density)

용적이 이탈되기 직전의 용융부 내에서 발생한 최대 유속은 2.9m/s 이고 이탈주기는 6.8msec이었다. 유속은 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 입상용적 모드와 비교하여 매우 증가하며 특히 축방향의 속도 성분이 지배적이다. 다양한 용접전류에 대하여 계산된 용적의 크기를 실험 결과와 비교하여 Fig. 10에 나타내었다. 계산 결과에 나타난 것처럼 용융 금속의 표면 장력 계수의 값에 따라 이탈 용적의 크기가 변화하며 전반적으로 실험 결과와 상당히 일치하였다.

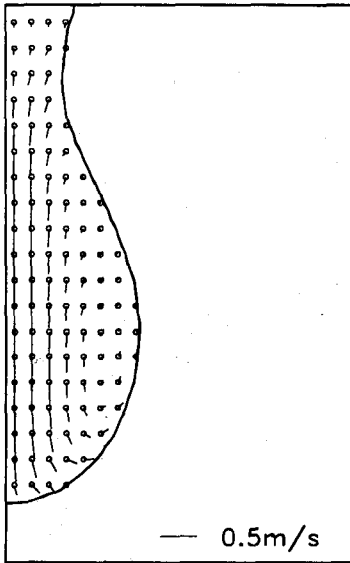


Fig. 7 Velocity profile of pendant drop at 150A

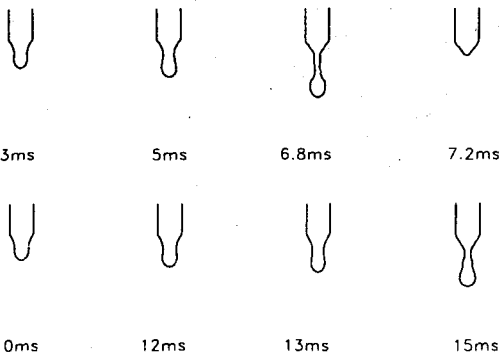


Fig. 8 Change of molten drop profile at 300A (linear current density)

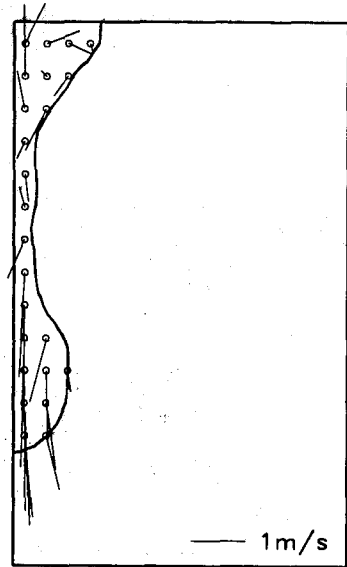


Fig. 9 Velocity profile of pendant drop at 300A

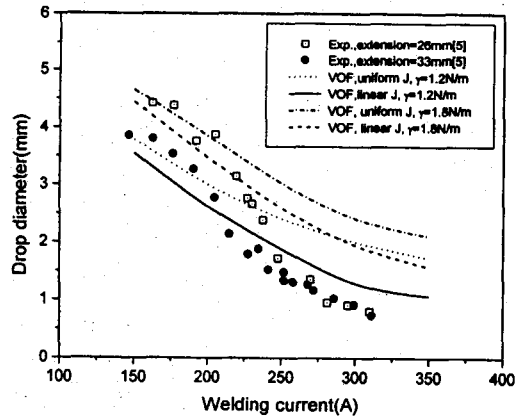


Fig. 10 Comparison of simulation results with experimental data

4. 이론적 해석을 이용한 응용

금속이행의 이론적 해석 방법을 이용한 응용으로 최근 인버터 용접기의 전류 파형을 제어하여 스파터를 감소시키기 위한 연구가 많이 시도되고 있으며, 일부 상용 제품도 생산되고 있다. 특히 스파터가 많이 발생하는 단락이행 모드에서 단락이 되기 직전과 이행이 완료되기 직전에 전자기력의 영

향을 감소시키기 위하여 용접전류를 감소시키는 방법이 널리 사용되고 있다^{16,17)}. 수치 해석을 이용한 이론적인 해석은 이와 같은 연구의 기초 자료로서 금속이행의 특성을 파악하는데 큰 역할을 할 수 있을 것으로 기대된다. 최근 VOF법을 이용한 연구¹⁸⁾가 수행되었으며 시간에 따른 단락 이행의 특성이 설명되었다. 표면 장력 계수, 용접전류, 용융부의 부피 및 모재와의 접촉면적 등을 변화시키며 계산한 연구 결과에 의하면 단락 이행의 초기에는 표면 장력과 교락부의 형상에 따른 압력이, 그리고 이행의 후기에는 전자기력이 금속이행에 큰 영향을 미친다. 향후 열해석을 포함시키면, 용접전류를 제어하여 스패터를 감소시키는 simulation을 구현할 수 있을 것으로 기대된다.

다양한 용접전류에 대하여 단락 이행 모드에서 교락부의 거동 변화를 추적한 계산 결과를 Fig. 11에 나타내었다. 단락 이행의 과정을 살펴보면, 초기에 곡률의 차이에 따른 압력차가 구동력으로 작용하며 시간이 증가함에 따라 핀치부가 회복된다. 이 과정에서 교락부의 bulge부는 위와 아래로 유동하고, 이후에는 관성 및 압력차, 그리고 전자기력에 의해 교락부의 유체는 용융 풀로 이행한다. 유체의 핀치부는 금속이행이 진행됨에 따라

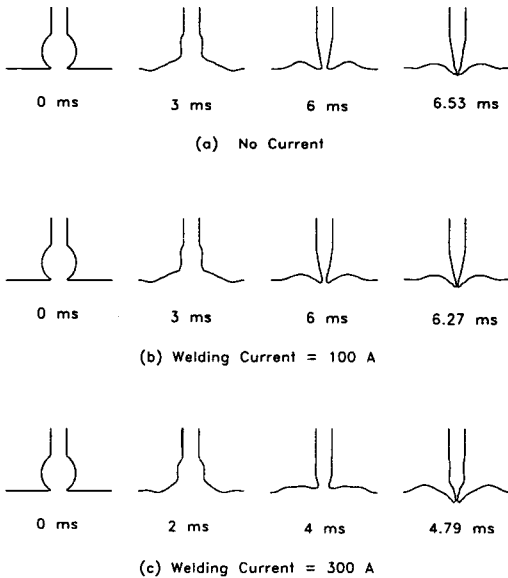


Fig. 11 Bridge profiles for various current with initial drop volume of 10mm³

점차 아래로 이동하며, 파단면은 교락부의 중심이 아닌 용적과 용융풀의 접촉부에서 발생한다. 계산 결과 용접전류 없이 중력과 표면 장력만으로 파단에 이르는 경우와 용접전류가 100A인 경우에 형상의 차이는 거의 나타나지 않으며, 용접전류가 300A인 경우에는 형상에는 큰 변화가 없으나 파단 시간이 상당히 감소한다.

펄스 전류를 이용한 금속이행 모드에서도 이론적 해석 방법을 이용하여 용접기의 전류 파형이 금속이행에 미치는 영향을 해석하는데 응용할 수 있다. 가장 간단하게 적용되는 방법은 기존의 힘평형 이론을 사용하고 에너지 보존식을 이용하여 금속의 용융을 고려하는 것이다^{3,5)}. 힘평형 모델은 축 대칭인 입의의 형상에 대한 해석이 가능하고 pulsed-GMA용접에서의 금속이행은 projected 모드와 유사하므로 이러한 방법을 사용하여도 어느 정도 해석이 가능하다고 판단된다. 그러나 펄스 전류는 입상 용적과 스프레이 모드의 전류 범위 내에서 변화하고, 피크 전류의 지속 시간이 길어질 때에 순간적으로 스프레이 모드가 발생할 수 있기 때문에 힘평형 모델을 그대로 사용하는 것은 문제가 있다. 이에 관련하여 pulsed-GMA 용접공정에서 펄스 전류의 주기와 크기에 따른 금속이행에 관한 동적 연구가 수행되었다¹⁹⁾. 이 연구에서는 펄스 전류에 따른 형상 및 속도 분포와 더불어 펄스에 따른 용적의 변위, 평균 속도의 상관 관계를 조사하였으며 용적의 이탈 메카니즘을 설명하였으며, 하나의 펄스에 하나의 용적이 이탈하는 펄스 파라미터의 적정 범위를 제안하였다.

하나의 펄스에 하나의 용적이 규칙적으로 이탈하는 용접조건에서 펄스 전류에 따라서 계산된 용적의 형상과 용융부 내부의 최대 속도를 Fig. 12에

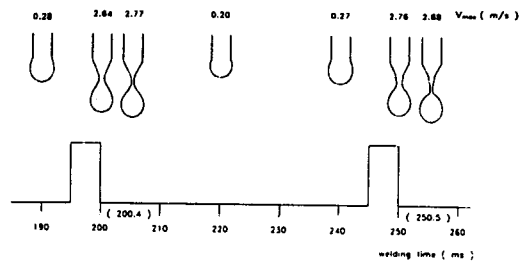


Fig. 12 Calculated free surface profiles with pulsed current
($I_p = 400A$, $I_b = 180A$, $D_p = 10\%$, $f_p = 20Hz$)

나타내었다. 계산결과 베이스 전류 구간에서 용융부 내부의 최대 속도는 대략 0.2-0.3 m/s인데 반하여 피크 전류가 가해지면 용융부는 가속되어 최대 속도는 2.6-3.0 m/s로 크게 증가한다. 베이스 전류 구간에서 용적의 이탈이 발생한 후에 속도는 감소하고 용융부의 형상도 구형으로 회복된다. 하나의 펄스에 하나의 용적이 이탈하기 위해서는 펄스 전류가 작용한 직후에 용적이 이탈하는 것이 이상적이며, 펄스전류가 작용할 때 가해진 전자기력이 용융부내에 축방향의 관성력을 발생시킴으로서 용적을 이탈시킨다.

지금까지 살펴본 바와 같이 VOF법과 전산 유체 역학을 도입한 동적 해석을 이용하면 GMA 용접의 금속이행을 상당히 정확하게 예측할 수 있다. 그러나 현재까지 GMA 용접의 금속이행에 관한 이론적 연구에서 아크를 포함한 분위기 가스의 영향이나 열적인 상호 작용에 의한 금속의 용융에 관한 연구는 아직 부분적으로만 수행되고 있는 실정이므로 이를 포함한 본격적인 동적 해석이 요구된다. 또한 수치해석은 많은 계산시간이 소요되므로 실험과 함께 단순화시킨 모델도 적절히 이용하면 실제 문제에 응용이 가능할 것으로 사료된다.

5. 결 론

GMA 용접의 금속이행은 자유 표면을 포함한 비정상 유동으로서 금속의 용융, 플라즈마, 강한 전자기력, 분위기 가스의 영향 등으로 매우 복잡한 양상을 나타낸다. 자유 표면을 고려한 동적 해석에서 위에 나열한 모든 현상을 모델링하고 이를 계산하는 것은 매우 어렵다. 그러나 컴퓨터의 성능이 향상되고 있으며 부분적으로 동적 해석이 시도되어 기존의 모델이나 이론보다 상당히 정밀하게 실제 용접 현상을 예측할 수 있는 가능성을 확인하였다. 컴퓨터의 성능 향상과 더불어 가까운 장래에는 GMA 용접의 금속이행에 관한 여러 가지 문제가 해결되리라고 기대한다. 또한, 현재 국내의 다양한 연구 결과²⁰⁾를 활용하여 실제 현장 문제에 적용하기 위한 응용 연구에 더욱 관심을 가질 필요가 있다.

참 고 문 헌

1. J.F. Lancaster : The physics of welding,

Pergamon Press, (1985)

2. J.C. Amson : Lorentz force in the molten tip of an arc electrode, Br. J. Appl. Phys., Vol. 16, (1965), pp. 1169-1179
3. J.H. Waszink and M.J. Piena : Experimental investigation of drop detachment and drop velocity in GMAW, Welding Journal, Vol. 65, (1986), pp. 289s-298s
4. C.J. Allum : Metal transfer in arc welding as a varicose instability. Part 1. Varicose instability in a current-carrying cylinder with surface change, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 18, (1985a), pp. 1431-1446
5. Y.-S. Kim : Metal transfer in gas metal arc welding, Ph.D. Thesis, MIT, (1989)
6. T.M. Joo, C.D. Yoo, and T.S. Lee : Effects of welding conditions on molten drop geometry in arc welding, ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 118, No. 4, (1996), pp. 623-627
7. 이강희, 최상균, 유중돈 : 용융부 형상을 고려한 GMA 용접공정의 금속이행 모델링, 대한용접학회지, 제13권 2호, (1995), pp 155-161
8. V.A. Nemchinsky : Size and shape of the liquid droplet at the molten tip of an arc electrode, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 27, (1994), pp. 1433-1442
9. L.E.L. Cram : A numerical model of droplet formation, in Computational Techniques and Applications, Ed. J. Noye and C. Fletcher, Elsevier Science Publishers (1984)
10. S.W. Simpson and P. Zhu : Formation of molten droplets at a consumable anode in an electric welding arc, J. Phys. D: Appl. Phys., Vol. 28, (1995), pp 1594-1600
11. 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, No. 12, (1965), pp. 2182-2189
12. C.W. Hirt and B.D. Nichols : Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of

- free boundaries, *Journal of Computational Physics*, Vol. 39, (1981), pp. 201-225
13. H. Maruo, Y. Hirata and N. Goto : Bridging transfer phenomena of conductive pendent drop (The effects of electromagnetic pinch force on the bridging transfer, Rept. 3), *Quarterly Journal of JWS*, Vol. 10, No. 2, (1992), pp. 251-258
 14. J. Haidar and J.J. Lowke : Predictions of metal droplet formation in arc welding, *J. Phys. D: Appl. Phys.*, Vol. 29, (1996), pp. 2951-2960
 15. 최상균, 유중돈, 김용석 : VOF 법을 이용한 GMA 용접의 금속이행에 관한 동적해석(1)-입상용적과 스프레이 이행에 관한 해석, *대한용접학회지*, 제15권 3호, (1997), pp. 168-178
 16. H. Yamamoto, S. Harada and T. Yasuda : The development of welding current control system for spatter reduction, *Welding International*, Vol. 4, No. 5, (1990), pp 398-407
 17. E.K. Stava : The surface-tension-transfer power source: A new, low-spatter arc welding machine, *Welding Journal*, Vol. 72, No. 1, (1993), pp 25-29
 18. 최상균, 고성훈, 유중돈, 김희진 : VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속 이행에 관한 동적 해석 (II) - 단락 이행 모드의 해석, *대한용접학회지*, 제15권 3호, (1997), pp 179-187
 19. 최상균, 유중돈, 박상규 : Pulsed GMAW 의 금속 이행 현상에 관한 동적 해석, *대한용접학회지*, 제15권 5호, (1997), pp 458-465
 20. 안영호, 이종봉, 엄동석 : GMA 용접이 용적 이행현상에 미치는 제인자의 영향, *대한용접학회지*, 제16권1호, (1998), pp. 17-24