연구논문

GMA용접 시스템의 동적 거동에 대한 해석

이재영* · 최재형* · 이지혜* · 유중돈*

*한국과학기술원 기계공학과

Analysis of Dynamic Behavior in GMAW System

Jae Young Lee*, Jae Hyung Choi*, Ji Hye Lee* and Choong Don Yoo*

*Department of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

Abstract

Dynamic behaviors of the GMAW system are simulated using the short-circuit transfer model and the characteristic equations for the power supply, wire system and arc. The conventional wire equation, which relates the rate change of the wire extension to the wire feed rate and melting rate, is modified to include effects of the molten drop attached at the wire tip. The modified wire equation describes behaviors of the GMAW system more precisely and provides information about the initial bridge volume for short-circuit transfer. The proposed short-circuit model predicts the variation of parameters such as the current, voltage, short-circuit frequency and time considering the effects of the surface tension and electromagnetic force due to current. The calculated results are in broad agreements with the experimental results under the argon shielding condition.

(Received March 25, 2000)

Key Words : Dynamic behavior of GMAW, Characteristic equation, Short-circuit modeling, Metal transfer, Argon shielding.

1. 서 론

GMA(Gas metal arc) 용접 공정의 용접변수로 용접전류와 전압, 용접속도, 와이어 송급속도, 컨택팁(Contact tip)에서 모재까지의 거리 (CTWD ; contact-tip to workpiece distance), 분위기 가스, 와이어 등을 들 수 있다. 적절한 용접조건은 실험적인 방법을 통하여 결정되지만, 많은 시행착오를 거쳐야 하므로 비효율적이라는 단점이 있다. GMA 용접 공정의 거동을 해석적인 방법이나 수치적인 방법으로 예측하는 것이 가능하다면, 용접변수의 대략적인 범위를 추정하여 실험의 횟수를 줄이거나 용접조건이 공정에 미치는 영향을 산출하는데 활용할 수 있다. 본 연구를 통하여 GMA 용접 시스템의 특성식과 단락이행의 모델을 이용하여 시스템의 동적 거동을 예측하고, 실험결과와 비교하여 제안된 모델의 타당성을 검증하였다.

GMA 용접 시스템 전체의 거동은 용접기와 와이어 용융 및 아크에 관한 특성식을 이용하여 해석하였다. Ushio[1,2] 등은 스프레이 이행모드와 펄스 미그(Pulsed MIG) 공정에 대한 용접 시스템의 동적 특성을 해석하는데 관련 특성식을 이용하였고, 이를 아크 센서의 동적 특성을 분석하는데 활용하였다. Quinn[3] 등은 열전달을 고려한 돌출길이의 변화를 모델을 통하여 예측하였고, 단락이행이 발생하는 조건을 결정하였다. Richardson[4] 등은 펄스 GMA 용접 공정에서 용접기의 동적 특성이 와이어의 용융에 미치는 영향에 관하여 연구하였다.

GMA 용접의 동적 특성에 금속이행이 큰 영향을 미치며, 금속이행을 해석하기 위하여 다양한 모델과 방법 들이 제안되었다. 입상용적과 스프레이 모드의 금속이행 현상을 해석하기 위하여 힘 평형 모델이나 핀치 불안정(Pinch instability) 이론이 널리 사용되고 있다[5]. 단락이행 모드의 경우에는 단락 시간을 계산하

는 단순 모델 들이 제안되었지만[6,7], 전자기력이나 표면장력의 영향을 고려하지 못하고 아크와 단락이 연속적으로 발생하는 경우에 적용하지 못하는 단점이 있다. 최근 발표된 수치해석 방법은 금속이행 현상을 비교적 정확하게 계산할 수 있지만[8,9], 계산시간이 많이 소요되고 전체 용접시스템의 특성을 고려하기 어렵다. 따라서 단락이행 모드에서 전자기력과 표면 장력의 영향을 고려하고 용접조건에 따른 단락 시간을 예측할 수 있는 모델이 요구된다.

본 연구는 크게 용접 시스템의 특성식을 이용한 GMA 용접 시스템의 모델링과 단락이행 모델링으로 구성된다. 용접 시스템의 동적거동을 해석하기 위하여 기존의 와이어 특성식을 수정하였으며, 단락이행 모드의 단락 시간을 예측하기 위한 모델을 제안하였다. 계산결과는 실험결과와 비교하여 모델의 타당성을 검증하였다.

2. 용접 시스템의 모델링

2.1 용접 시스템 특성식

용접기와 와이어 및 아크의 특성식을 사용하여 GMA 용접 시스템의 동적 거동을 해석하였다. 정전압 특성의 GMA 용접기는 Fig.1에 보인 바와 같이 저항과 인덕턴스로 구성된 RL 회로로 모델링하였다[10].

$$L\frac{dI}{dt}+(R+R_e)I=U_o-U_a \tag{1}$$

이때, L은 인덕턴스, I는 전류, R은 용접기의 내부저항, R_e는 와이어 돌출부에 걸리는 저항, U_o는 용접기의 개방전압 (equivalent open circuit voltage), U_a는 아크 전압을 나타낸다. 이때 돌출부에 걸리는 저항은 와이어의 비저항(resistivity)를 이용하여 계산하였다. 아크의 특성식으로 아크 전압을 용접전류와 아크 길이로 표현한 Ayrton의 식을 사용하였다[11].

$$U_a=k_1+k_2I+(k_3+k_4I)\ell_a \tag{2}$$

이때, ℓ_a는 아크 길이, $k_1 \sim k_4$는 와이어의 재질과 분위기 가스에 따라 변화하는 상수를 나타낸다.

와이어 특성식은 돌출길이의 변화율과 와이어 송급속도 및 용융속도의 관계를 나타낸다. 기존의 와이어 특성식은 와이어 끝의 용융 부분이 연속적으로 이탈한다고 가정하여 돌출길이의 변화를 아래와 같이 표현하였다[5].

$$\frac{d\ell_e}{dt}=v_f-v_m,\ v_m=aI+b\ell_eI^2 \tag{3}$$

이때, ℓ_e 는 돌출 길이, v_f는 와이어 송급속도, v_m은 아크 열과 저항 열에 의한 와이어 용융속도를 나타내며, a와 b는 금속이행 모드와 분위기 가스에 따라 변화하는 상수이다. 와이어 끝에서 용융된 부분이 용적을 형성하지 않고 연속적으로 이탈한다는 가정은 작은 용적이 높은 주파수로 이탈하는 스프레이 모드에서 타당한 것으로 판단된다. 그러나, 와이어 직경보다 큰 용적이 낮은 주파수로 이탈하는 입상용적 모드에서는 와이어 끝에서 형성되는 용적이 용접전류나 전압 등의 용접조건에 영향을 미칠 것으로 추정된다.

본 연구에서는 용적이 이탈되기 전까지 용접전류와 전압에 미치는 영향을 고려하기 위하여 Fig.1에 나타낸 바와 같이 돌출길이를 고체상태의 와이어 길이(ℓ_{es})와 용적 길이(ℓ_{ed})의 합으로 표현하였다 (즉, $\ell_e=\ell_{es}+\ell_{ed}$). 이와 같이 돌출길이를 두 부분으로 구분하면 입상용적과 스프레이 모드에서 용적이 용접변수에 미치는 영향을 고려할 수 있을 뿐만 아니라, 용적이 이탈하거나 단락이 발생하는 순간에 용적의 부피를 계산할 수 있다. 용적이 이탈하기 전까지 고액 경계면의 변화와 용적의 체적 증가율은 다음과 같다.

$$\frac{d\ell_{es}}{dt}=v_f-v_m \tag{4}$$

$$\frac{dV_o}{dt}=\left(\frac{\pi D_e^2}{4}\right)v_m \tag{5}$$

이때, V_o는 용적의 부피, D_e는 와이어 직경을 나타낸다. 용적을 구형으로 가정하면, ℓ_{ed} 는 식 (5)를 이용하여 계산되는 용적의 체적으로부터 구한다. 용적의 이탈 여부는 천이전류를 기준으로 힘 평형 모델과 핀치 불안정 이론을 적용하여 판별하였으며, 용적이 이탈하는 순간에 용적 부피가 모두 이탈한다고 가정하였다 (즉, $\ell_{ed}=0$). 와이어 송급속도가 빠르거나 와이어 용융속도가 낮아서 돌출길이가 CTWD와 같게 되면 단락이 발생하며, 단락 기간 동안 아크가 소멸하므로 식 (1)의 아크 전압과 식 (3)의 아크 열과 관련한 상수 a는 0이 된다.

2.2 단락이행 모델링

단락이행은 표면장력과 전자기력에 의하여 영향을 받는 것으로 알려져 있으므로[7~9], 본 연구에서는 표면장력과 전자기력의 영향을 고려하여 단락 내부의 압력과 유속을 계산하고 단락 시간을 예측하는 단순 모델

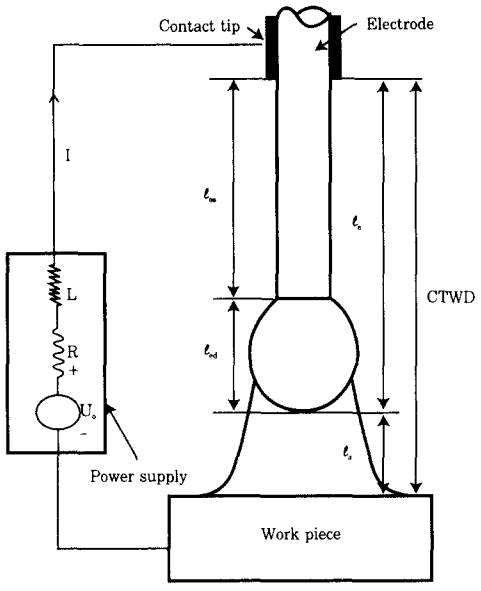


Fig. 1 Schematic of GMAW system

을 제안하였다. 복잡한 단락이행 현상을 단순화 시키기 위하여 다음과 같은 가정을 하였다. 1) 단락부의 초기 형상은 구형이고 단락 기간 동안 용융 풀과의 접촉 반경은 와이어의 반경과 동일하며, 단락이행 중에 변화하지 않는다. 2) 단락 내부의 유속과 용융 풀 내부의 압력은 무시한다. 3) 단락부의 형상은 표면장력과 전자기력에 의하여 연속적으로 변화하며, 미소 시간 동안 발생하는 유속은 일정하다. 4) 용융풀의 표면은 평평하며 금속이행은 안정하다.

단락부의 형상은 Fig.2(a) 에 보인 바와 같이 단락부의 용융 금속이 모재로 이행되어 연속적으로 변화하도록 모델링하며, 단락부 형상은 Fig.2(b)에 보인 바와 같이 일정한 곡률반경 R_1과 R_2로 표현하였다. 단락부의 곡률에 의한 표면장력과 전류로 인한 전자기력에 의하여 단락부에 압력이 발생하며, 단락부 중심의 평균 압력은 다음과 같다.

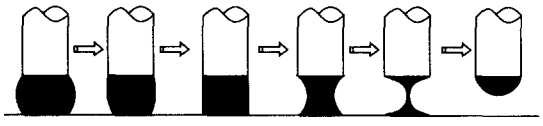
$$P = \frac{\mu_o I^2}{8\pi^2 R_1^2} + \lambda\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) \tag{6}$$

이때, λ는 표면장력, μ_o는 투자율 나타낸다. 내부 압력에 의하여 단락부와 용융 풀의 접촉면에서 유속이 발생한다. 가정[2]와 같이 단락내부의 유속과 용융 풀 내부의 압력을 무시하면, 단락부 중심의 압력을 베르누이 (Bernoulli)식에 대입하여 접촉면에서의 유속을 구할 수 있다.

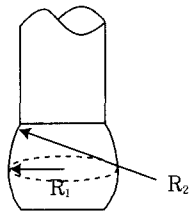
$$v = \sqrt{\frac{2}{\rho}(P + \rho g h)} \tag{7}$$

이때, ρ는 용적의 밀도, h는 단락부 중심에서 용융 풀 접촉면까지의 거리를 나타낸다. 미소 시간 Δt동안 유속이 일정하다고 가정하면 Δt동안 이행된 용융 금속의 체적을 계산할 수 있으며, 전체 단락 시간은 단락부의 체적이 완전히 이행되는데 소요되는 시간으로 각 단계에 해당하는 미소시간의 합으로 구한다. 아크용접에서 베르누이 식을 사용한 예로서 아크 유속의 계산을 들 수 있으며[5], 계산으로 구한 아크 유속은 실험결과와 오더 범위(order of magnitude)에서 일치하였으므로 단락이행 모델로 계산된 유속과 단락 시간도 이와 유사한 오차 범위에서 계산될 것으로 판단된다.

용접기의 개방전압, 와이어 송급속도와 CTWD가 입력으로 주어지면, 미분 방정식을 포함하는 특성식을 Runge-Kutta 방법을 이용하여 시간에 따른 용접변수와 용적 부피의 변화를 수치적으로 계산하였다. 입상용적과 스프레이 모드는 천이전류를 기준으로 구분하고, 용적의 이탈 여부는 힘 평형 모델과 핀치 불안정 이론을 적용하여 판정하였다. 단락이행이 발생하면 식 (1)과 (3)의 아크 전압과 아크 열의 영향을 0으로 설정하고 단락이행 시간과 용접전류와 전압의 변화를 계산하였다. 파단이 발생하면 단락부 체적의 반은 와이어 끝에 잔류시키고 (Fig.2(a)), 아크가 재발생하므로 식(1)과 (3)의 아크 전압과 아크 열의 영향을 복귀시켰다.



(a) Sequence of short-circuit transfer



(b) Bridge shape with principal radii

Fig. 2 Schematics of short-circuit model

3. 결과 및 고찰

3.1 스프레이와 입상용적 모드의 해석

Table 1에 나타난 상수값과 용접기의 인덕턴스와 저항을 이용하여 계산을 수행하였으며[1,2,12], 계산결과와 비교하기 위하여 GMA 용접실험을 수행하였다. 용

Table 1 Constants used for calculation

Mass density, ρ	7800 kgm^{-3}
Kinematic viscosity, ν	2.8×10^{-7} m^2s^{-1}
Surface tension coefficient, γ	1.2 Nm^{-1}
Permeability, μ_0	$4\pi\times10^{-7}$ Hm^{-1}
Wire melting coefficient, a	0.2940 $mmA^{-1}s^{-1}$(GL) 0.2383 $mmA^{-1}s^{-1}$(SP) 0 $mmA^{-1}s^{-1}$(SC)
Wire melting coefficient, b	$4.61\times10^{-5}A^{-2}s^{-1}$(GL) $4.60\times10^{-5}A^{-2}s^{-1}$(SP) $6.27\times10^{-5}A^{-2}s^{-1}$(SC)
Power supply resistance, R	5.0 mVA^{-1}
Power supply inductance, L	0.35 mH
Constant component of arc voltage, k_1	16.24 V
Electric resistance of arc column, k_2	0.02376Ω
Electric field intensity in arc column, k_3, k_4	0.553 Vmm^{-1}, $6.395\times10^{-4}VA^{-1}mm^{-1}$

접기는 최대 출력이 350A인 인버터(inverter) 타입이며, 직경 1.2mm인 강 용접와이어 (YGW-15)와 아르곤 가스를 사용하여 SS41 강판에 비드 (bead-on-plate) 용접을 하였다. 용접조건으로 CTWD를 15-25mm, 용접전류와 전압을 각각 150-290A와 18-34V의 범위에서 변화시켰다. 용접전류와 전압 및 와이어 송급속도를 측정하였으며, 전류와 전압의 파형 및 관찰 결과로부터 금속이행 모드를 판별하였다. 이때 전류, 전압 및 송급속도의 신호에 대해서 저역 필터 회로(cut off frequency 150Hz)로 처리하고 4KHz의 샘플링 주파수로 1.5초 동안 데이터를 획득하였다.

Fig.3은 와이어 송급속도를 156.1mm/s, CTWD를 19mm, 용접전압을 32.0V로 용접조건을 설정하고 측정한 스프레이 모드의 전류와 전압 파형을 나타내며, 평균 전류와 전압은 343.2A와 32.7V 이다. 실험과 동일한 조건에서 용접기의 개방전압을 32.0V로 설정하고, 기존의 와이어 특성식과 수정된 특성식을 이용하여 계산한 결과를 비교하여 Fig.4에 나타내었다. 수정된 와이어 특성식을 사용한 결과, 용적이 와이어 끝에서 이탈하는 순간 아크 길이가 증가하므로 용접전압은 증가하고 전류는 감소하였다. 그러나 기존의 특성식을 사용하면 용적의 성장 및 이탈이 고려되지 않기 때문에 전류와 전압은 정상상태에서 341.1A와 30.3V의 일정한 값을 유지하는 것으로 계산되었으며, 이 값은 수정된 특성식으로 구한 결과의 평균값에 해당한다. 특성식을 이용하여 계산한 평균 용접전류와 전압은 실험결과와 오차 8% 이내에서 일치하였다.

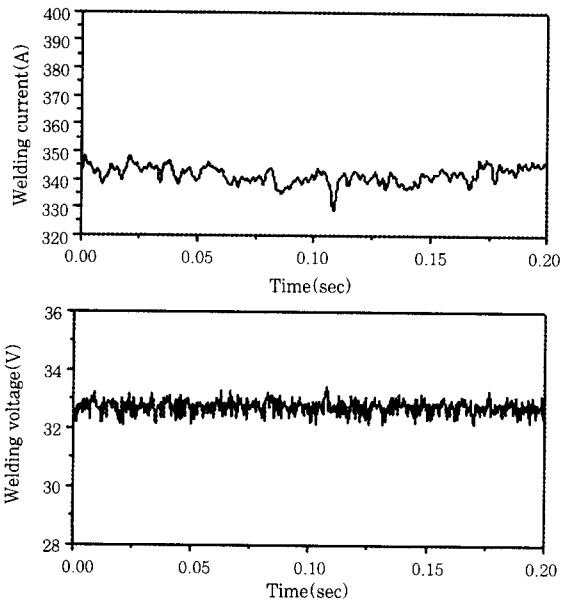


Fig. 3 Experimental current and voltage waveforms in spray mode

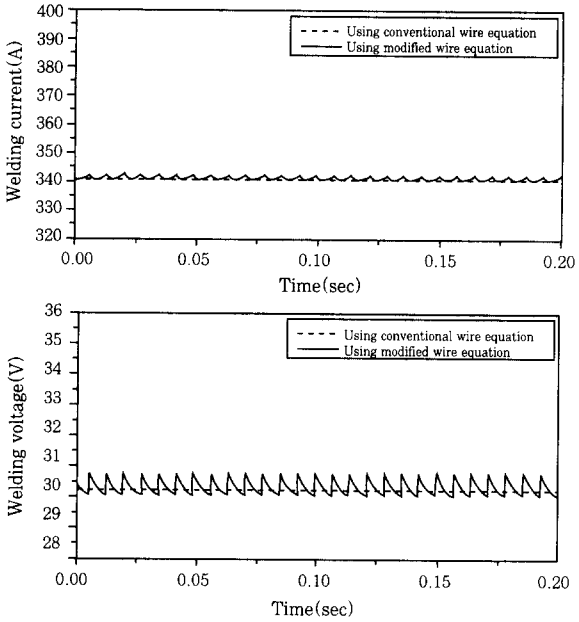


Fig. 4 Calculated results in spray mode using conventional and modified wire equations

Fig.5는 와이어 송급속도를 104.3mm/s, CTWD가 25mm, 용접전압을 27.0V로 용접조건을 설정하고 측정한 입상용적 모드의 전류와 전압 파형을 나타내며, 평균 전류와 전압은 207.3A와 27V이다. 동일한 조건에서 용접기 개방전압으로 27.0V로 설정하고, 기존의 와이어 특성식과 수정된 와이어 특성식을 이용하여 계산한 결과를 비교하여 Fig.6에 나타내었다. 입상용적 모드에서는 큰 용적이 낮은 주파수로 이행되므로 전류 및 전압의 변동폭이 비교적 크다. 기존의 와이어 특성

식을 사용한 경우는 이런 특징이 나타나지 않고 전류와 전압은 214A와 25.9V의 일정한 값을 가지며, 이는 수정된 특성식을 사용하는 경우의 평균 용접전류와 전압과 동일하다. 전류와 전압의 변동폭이 증가한 것을 제외하면 입상용적 모드의 전반적인 추세는 스프레이 모드와 유사하며, 계산결과와 실험결과는 오차 8% 이내에서 일치하였다.

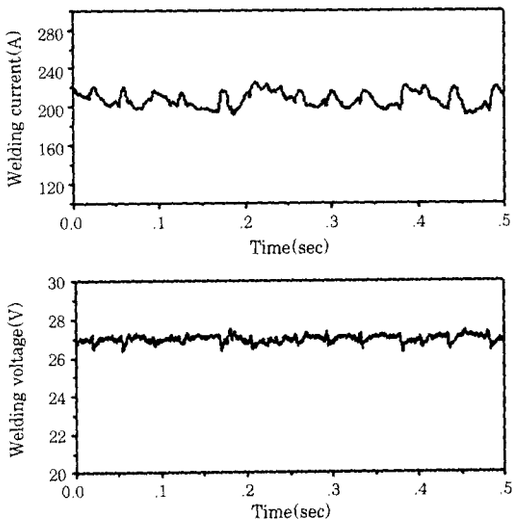


Fig. 5 Experimental current and voltage waveforms in globular mode

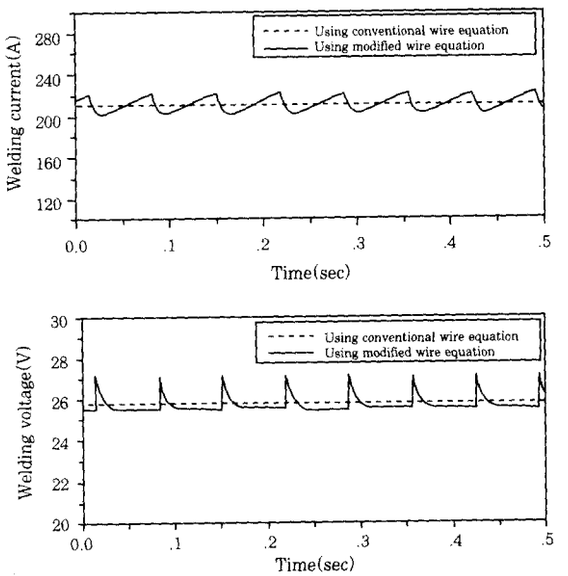


Fig. 6 Calculated results in globular mode using conventional and modified wire equations

이와 같은 결과로부터 스프레이와 입상용적 모드에서 계산결과는 실험결과를 상당히 정확하게 예측할 수 있었으며, 수정된 와이어 특성식을 사용하면 용적의 성장 및 이탈에 따른 용접전류와 전압의 동적 특성을 예측할 수 있다. 스프레이와 입상용적 모드에서 용접 시스템의 동적 특성을 해석하는데 기존의 와이어 특성식을 사용하면 정상상태에서 전류와 전압이 일정한 값으로 계산되어 용적의 성장과 이탈이 용접변수에 미치는 영향을 고려할 수 없지만, 수정된 와이어 특성식을 사용하는 경우와 비교하여 큰 차이점이 없을 것으로 판단된다. 그러나 단락이행 모드와 연계하여 해석하려면 수정된 와이어 특성식을 사용하여야 한다.

3.2 단락이행 모드의 해석

단락이행 모드에서 용접전류와 초기 단락부의 부피가 단락 시간에 미치는 영향은 Fig.7에 나타난 바와 같이, 초기 단락부의 부피(단락부의 직경)가 증가하면 단락 시간은 증가하며, 단락 초기전류가 증가함에 따라 단락 시간은 선형적으로 감소한다. 이와 같은 관계는 식(6)과 (7)의 전류, 압력 및 유속의 관계를 이용하여 설명할 수 있으며, 이 식으로부터 유속은 전류에 비례한다. 단락 시간은 단락부의 체적을 유속과 고정된 단면적으로 나눈 값이므로 단락 시간은 단락부의 체적에 비례하고 전류에 반비례하는 관계를 갖게 된다. 단락부의 형상이 단락기간 중에 연속적으로 변화하므로 단락 시간과 체적 및 전류는 비선형적인 관계를 갖게 되지만 Fig.7의 개략적인 추세와 일치한다.

Fig.8은 와이어 송급속도를 82.1mm/s, CTWD를 19mm, 용접전압을 21.2V로 용접조건을 설정하고 측정한 단락이행 모드의 용접전류와 전압파형을 나타낸다. 평균 전류와 전압은 184.6A와 18.9V이며, 단락 주파수는 66Hz, 평균 단락과 아킹 시간은 2.3과 12.9 ms이다. 동일한 조건에서 개방전압을 21.2V로 설정하여 계산한 용접전류와 전압 파형을 Fig.9에 나타내었다. 평균 용접전류와 전압은 174A와 20.3V이

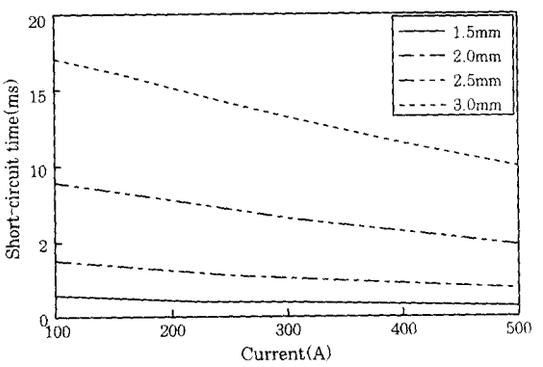


Fig. 7 Effects of initial bridge volume(bridge diameter) and current on short-circuit time

며, 단락 주파수는 55Hz, 평균 단락과 아킹 시간은 1.1ms와 16.9 ms이다. 단락 시간의 경우 실험결과가 계산결과 보다 약 2배 정도 큰 오차가 발생하며, 이와 같은 오차는 단락부의 용융풀과의 접촉면적의 연속적인 변화 및 금속이행시 점성의 효과를 고려하지 못했기 때문인것으로 사료된다. 또한 베르누이 식을 적용하기 위한 가정 2)가 실제 금속이행 현상을 너무 단순화시켰기 때문에 발생한 것으로 추정된다. 단락 시간에 비하여 단락 주파수와 아킹 시간은 실험결과와 비교적 일치하는 경향을 보인다. 이는 실험과 계산으로 구한 아킹 시간이 12.9ms와 16.9ms로 유사하고, 한 단락주기 내에서 아킹 시간이 차지하는 비율이

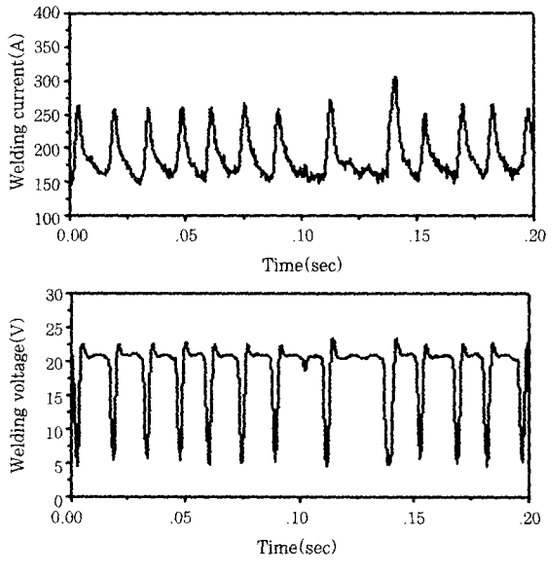


Fig. 8 Experimental current and voltage waveforms in short-circuit mode

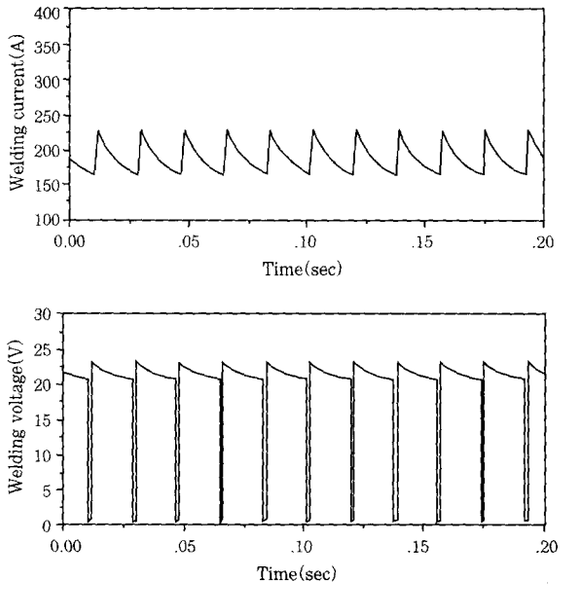


Fig. 9 Calculated results in short-circuit mode

85% 이상이기 때문이다. 그러므로 실험과 계산으로 구한 단락 시간이 크게 차이가 발생하여도 단락 주파수의 차이는 상대적으로 감소한다. 계산된 피크(peak) 전류는 실험값보다 40A 정도 낮으며, 이는 계산으로 구한 단락 시간이 짧기 때문에 전류 상승 시간이 감소하여 계산에 의한 피크 전류는 감소한다. 평균 전류 및 전압의 계산결과는 실험결과와 8% 정도의 오차 내에서 비교적 잘 일치하였고, 파형의 전반적인 추세도 유사하였다.

3.3 금속이행 모드의 예측

단락이행 모드와 입상용적 또는 스프레이 이행모드의 경계에 해당하는 용접조건에서는 두 종류의 이행모드가 혼합되어 발생한다. 와이어 송급속도를 82.1mm/s CTWD를 19mm, 용접전압을 22.0V로 설정한 조건에서 측정한 용접전류와 전압 파형을 Fig.10에 나타내었다. 평균 용접전류와 전압은 175.7A와 22V이며, 단락이행의 경우 주파수는 11Hz, 평균단락 시간은 4.9ms이다. 실험과 동일한 용접조건에서 개방전압을 22.0V로 설정하여 계산한 용접전류와 전압 파형을 Fig.11에 나타내었으며, 평균 용접전류와 전압은 180A와 21.1V이다. 단락이행 모드에서의 평균 단락 주파수와 단락 시간은 8Hz와 6.1ms이며, 아크 재발생 직후 Fig.11의 전압 파형에 나타난 바와 같이 입상용적 모드로 용적이 이탈하였다. 평균전류와 전압의 경우 실험과 계산결과가 잘 일치하였다.

CTWD를 19mm로 고정시키고 와이어 송급속도를

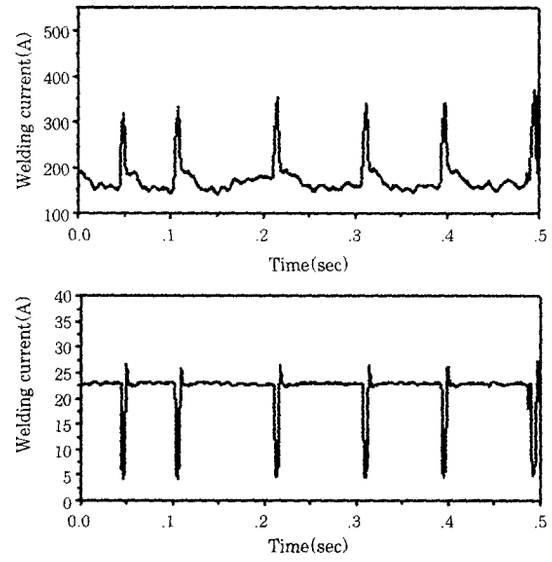


Fig. 10 Experimental current and voltage waveforms in mixed mode

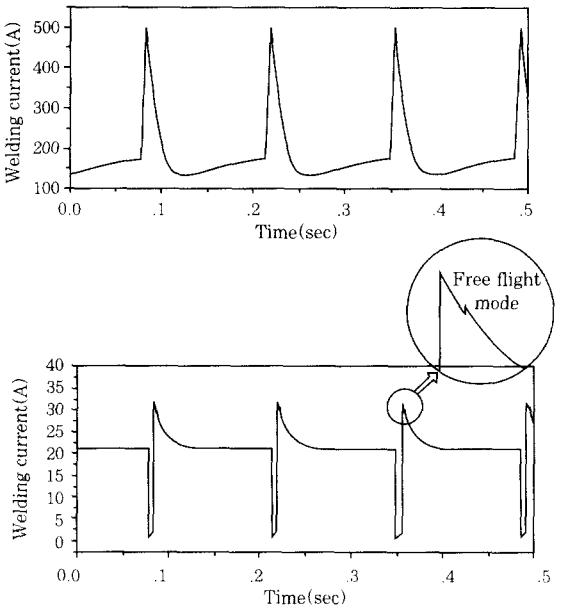


Fig. 11 Calculated results in mixed mode

80-180mm/s의 범위에서 변화시키며 측정한 용접전류와 전압 파형으로부터 금속이행 모드를 판별하여 Fig.12에 나타내었다. 실험과 동일한 용접조건을 이용하여 용접전류와 전압을 계산하여 혼합 모드가 발생하는 영역을 그림에 표시하였다. 혼합모드의 아래 영역은 단락이행 모드이며, 위 영역은 입상용적 또는 스프레이 모드를 나타내고 천이전류 220A를 기준으로 구분하였다. 혼합 모드에서 전류가 증가하면 전압이 완만하게 증가하는 것으로 계산되었으며, 저전류 영역에서 실험결과와 오차가 발생하지만, 비교적 정확하게 단락이행이 발생하는 영역을 예측하였다.

본 연구에서 제안한 단락이행 모델을 이용하여 용접조건에 따른 금속이행 모드, 평균 용접전류와 전압, 단락이행 주파수를 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 그러므로 적정 용접조건을 결정하는데 활용하거나 이

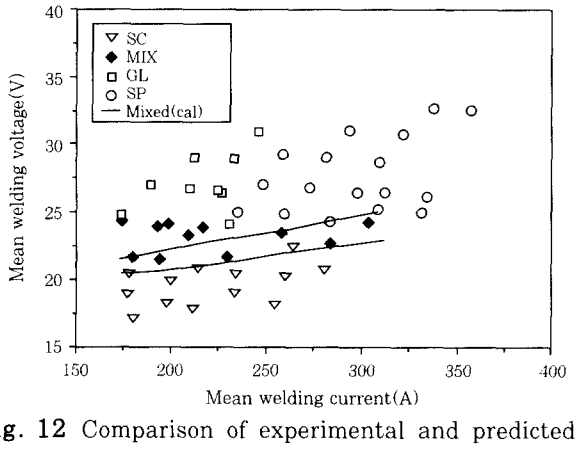


Fig. 12 Comparison of experimental and predicted metal transfer modes

탈 용적의 부피나 단락이행의 초기 부피와 단락 주파수로부터 금속이행의 안정성을 판별하는데 활용될 수 있을 것으로 예상된다. 그러나 제안한 단락이행 모델을 이용하여 계산한 단락 시간은 실험결과와 큰 오차가 발생하기 때문에 이에 대한 보완과 용접속도를 고려할 수 있도록 보완하는 것이 필요하며, 아르곤 가스 이외에 CO_2 또는 혼합가스를 사용하는 조건에 적용하는 것이 요구된다.

4. 결 론

용접기와 아크 및 와이어 시스템에 관한 특성식과 단락이행 모델을 이용하여 GMA 용접 시스템의 동적 거동을 예측하였다. 기존의 와이어 특성식을 수정하여 와이어 끝의 용융부가 용접전류와 전압에 미치는 영향을 예측하였고, 표면장력과 전류에 의한 전자기력을 고려한 단락이행 모델을 이용하여 단락 주파수와 단락시간을 계산하였다. 기존의 와이어 특성식을 이용한 결과는 수정된 와이어 특성식으로 구한 결과의 평균값에 해당하며, 입상용적이나 스프레이 모드의 동적 특성을 계산하는데 큰 차이가 없다. 수정된 와이어 특성식은 용적의 이탈 체적과 단락이행 모드에서 초기 단락부 체적의 계산에 유용하며, 이를 이용하여 동적 거동을 연속적으로 계산하는 것이 가능하다. 수정된 와이어 특성식을 포함한 시스템 특성식과 단락이행 모델을 이용하여 두 종류의 금속이행 모드가 동시에 발생하는 혼합 모드 영역을 예측할 수 있었다. 아르곤 가스와 직경 1.2mm인 강 와이어를 사용하는 경우, 실험결과와 비교하여 단락 시간의 경우에는 상당한 오차가 발생하였지만, 용접전류와 전압, 금속이행 모드, 단락 주파수는 비교적 정확하게 예측하였다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 국제공동연구과제 (996-1000-002-2)의 지원을 받아 수행하였으며, 이에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. M. Ushio and W. Mao : Modeling of an arc sensor for DC MIG/MAG welding in open arc mode : Study on the improvement of the sensitivity and the reliability of the arc sensor in GMA welding (1st report), Welding International, 10-8 (1996), 622-631.
2. M. Ushio and W. Mao : Dynamic characteristics of an

arc sensor in GMA welding in dip transfer mode : Study of improvement of sensitivity and reliability of arc sensor in GMA welding (3rd report), Welding International, 12-4 (1999), 272-281.
3. T.P. Quinn, R.B. Madigan and T.A. Siewert : An electrode extension model for gas metal arc welding, Welding Journal, 73-10 (1994), 241s-248s.
4. I.M. Richardson, P.W. Bucknall and I. Stares : The influence of power source dynamics on wire melting rate in pulsed GMA welding, Welding Journal, 73-2(1994), 32s-37s.
5. J.F. Lancaster : The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press, (1986).
6. 황주호, 문형순, 나석주, 한광수 : 가스 메탈 아크 용접에서 스패터 감소를 위한 용접 전원 제어에 관한 연구, 대한용접학회지, 14-1 (1996), 57-67.
7. Y.S. Ishchenko : Relationships governing droplet transfer during a short circuit, Welding International, 7-8 (1993), 627-631.
8. 최상균, 유중돈, 김용석 : VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속이행에 관한 동적해석 (I)- 입상용적과 스프레이 이행 모드의 해석, 대한용접학회지, 15-3 (1997), 168-178.
9. 최상균, 고성훈, 유중돈, 김용석: VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속이행에 관한 동적해석 (II)- 단락이행 모드의 해석, 대한용접학회지, 15-3 (1997), 179-186.
10. 대한용접학회 : 용접.접합 편람, 명현문화사, (1998).
11. J.W. Kim and S.J. Na : A study on prediction of welding current in GMAW, Proc. Inst. of Mech. Engrs, PartB, 205-B1 (1991), 59-63.
12. Welding handbook, Volume2, AWS, 8th Ed., (1991).