연구논문

동적 힘 평형 모델을 이용한 GMA 용접의 용적이행 해석

최 재 형* · 이 지 혜* · 유 중 돈*

*한국과학기술원 기계공학과

Analysis of Metal Transfer using Dynamic Force Balance Model in GMAW

Jae H. Choi*, Jihye Lee* and Choong D. Yoo*

*Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Taejon 305-701, Korea

Abstract

A dynamic force balance model is proposed in this work as an extension of the previous static force balance model to predict metal transfer in arc welding. Dynamics of a pendant drop is modeled as the second order system, which consists of the mass, spring and damper. The spring constant of a spherical drop at equilibrium is derived in the closed-form equation, and the inertia force caused by drop vibration is included in the drop detaching condition. While the inertia force is small in the low current range, it becomes larger than the gravitational force with current increase. The inertia force reaches half of the electromagnetic force at transition current, and has considerable effects on drop detachment. The proposed dynamic force balance model predicts the detaching drop size more accurately than the static force balance model.

(Received February 2, 2001)

Key Words : Dynamic force balance model, Second order system, Metal transfer, GMAW, Inertia force

1. 서 론

GMA 용접의 품질에 큰 영향을 미치는 용적이행 현상을 해석하기 위하여 다양한 모델이 사용되고 있으며, 최근 수치해석 방법을 이용하여 용적이행의 동적 거동을 예측하였다. 본 연구에서 용적의 거동을 질량-스프링-댐퍼(mass-spring-damper)로 구성된 2차 시스템으로 모델링한 동적 힘 평형 모델(dynamic force balance model, DFBM)을 제안하였고, 용적이행의 동적 특성과 안정성에 대한 해석을 수행하였다.

정적 힘 평형 모델(static force balance model, SFBM)과 pinch instability theory(PIT)는 입상용적과 스프레이 모드에서 발생하는 용적이행 현상을 해석하는데 사용되었다[1,2]. SFBM은 용적에 작용하는 힘의 평형으로부터 용적이 이탈하는 조건과 용적의 크기 등을 계산할 수 있다. 용적에 작용하는 힘의 성분은 표면장력, 전자기력, 중력 및 항력이며, 용적의 이탈 조건으로 부착력과 이탈력을 비교하였다. 그러나 SFBM은 정적인 힘을 계산하기 때문에 관성력 등의 동적 요인에 의한 영향을 고려하지 못하며, 실험 결과와 많은 오차가 발생한다. Jones 등은 용적의 형상을 다항식으로 모델링하여 넥킹(necking)을 포함한 용적이행의 동적 해석을 수행하였다[3]. 용적이행 현상을 정확하게 예측하기 위하여 수치해석 방법이 사용되었으며, 이를 이용하여 용적의 형상, 유동 및 온도를 계산하였다[4]. 수치해석 방법을 이용하여 용적이행의 동적 거동을 예측할 수 있지만, 계산시간이 많이 소요된다. 수치해석 결과로부터 용적의 이탈과 성장 과정에서 진동 현상이 관찰되었으며, 이와 같은 용적의 진동 현상은 관성력 등의 동적 요인이 용적 이행에 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

본 연구에서는 기존의 SFBM에 관성력을 포함시킨 DFBM을 제안하였다. 용적의 거동을 질량-스프링-댐퍼로 구성된 2차 시스템으로 모델링하였으며, 용적의

진동에 의해 발생하는 관성력을 용적 이탈 조건에 포함시켜 이탈시 용적의 크기를 계산하였다. DFBM를 이용하여 계산한 이탈 용적의 크기와 진동 주파수를 SFBM과 PIT의 계산 결과 및 실험 결과[5]와 비교하였으며, 용접조건에 따른 용적이행의 안정성에 관하여 고찰하였다.

2. 동적 힘 평형 모델링

용적의 동적 거동을 모델링하기 위하여 Fig. 1에 보인 바와 같이 평형 상태에서 용적의 형상은 구형이고 진동시 타원체로 변화한다고 가정하였다. 편의상 축방향으로 늘어난 타원 형상을 Type 1, 반대 방향의 타원 형상을 Type 2 라고 정의하였다.

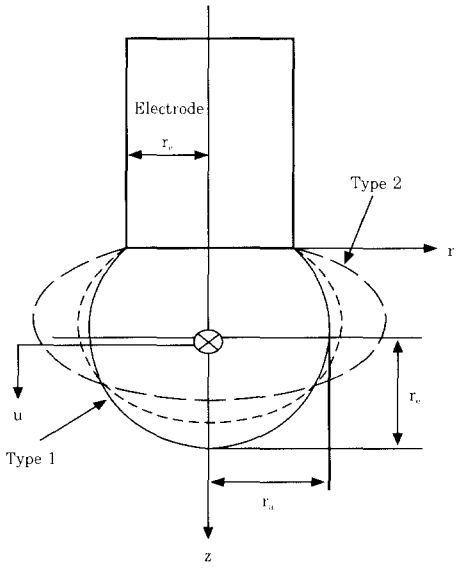


Fig. 1 Ellipsoidal geometry of pendent drop

용적의 거동을 2차 시스템으로 모델링할 수 있으며, 용적의 크기가 와이어 용융에 의해 시간에 따라 변화하기 때문에 2차 시스템의 질량, 스프링 상수 및 감쇄 상수는 시간의 함수로 표현된다.

$$m(t)\ddot{u} + c(t)\dot{u} + k(t)u = F(t) \tag{1}$$

이때, u는 용적 중심의 변위, F(t)는 용적에 작용하는 전자기력과 중력 및 항력을 나타낸다. 용적의 질량은 아크열과 저항열에 비례하는 와이어 융용 속도(wire melting rate)에 의해 결정된다.

$$m = \rho V_d \tag{2}$$
$$\dot{m} = \rho A_w v_m,\ v_m = aI + b\, l_e I^2$$

이때, r는 와이어의 밀도, V_d는 용적의 부피, v_m은 와이어 용융 속도, A_w는 와이어의 단면적, I는 전류, l_e는 돌출길이(wire extension)를 나타낸다.

용적의 스프링 상수는 용적의 동적 거동에 있어 매우 중요하며, 표면장력과 용적의 표면적의 곱으로 표현되는 위치 에너지(potential energy)로부터 유도할 수 있다[6]. 2차 시스템에서 위치 에너지의 변화는 용적 중심 변위와 스프링 힘의 곱이므로 용적의 스프링 상수는 다음과 같다.

$$dU = \gamma dS = F_s du,\quad k = dF_s/du \tag{3}$$

이때, γ는 표면장력 계수, S는 용적의 표면적, F_s는 스프링 힘을 나타낸다. 평형상태의 구형 용적에서 타원체 용적 형상으로 변화하는 경우에 대한 스프링 상수를 위의 식을 이용하여 수치적으로 계산할 수 있다.

용적 중심의 변위가 작다고 가정하면, 평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수를 함수 형태의 식으로 유도할 수 있다. 일반적으로 용적은 Type 1 모드로 진동하며 (r_c>r_a), Type 1 모드에서 타원체 용적의 표면적은 다음과 같다.

$$S = \pi r_a\left[r_a + \alpha \sin^{-1}\left(\frac{r_c}{\alpha}\right) + \frac{\beta}{\alpha}\sqrt{\alpha^2 - \beta^2} + \alpha \sin^{-1}\left(\frac{\beta}{\alpha}\right)\right]$$
$$\alpha = r_c^2/(r_c^2 - r_a^2)^{1/2},\ \beta = (r_c/r_a)(r_a^2 - r_e^2)^{1/2}, \tag{4}$$

이때, r_e는 와이어의 반경, r_a와r_c는 Fig. 1에 보인 바와 같이 타원체 용적의 주축 반경을 나타낸다. 용적의 부피가 일정한 조건에서, 식(4)의 고차항을 소거하면, 구형과 타원체의 반경의 관계는 다음과 같다.

$$r_o^3 \cong r_o r_a^2 \tag{5}$$

이때, r_0는 평형 상태에서 구의 반경을 나타낸다. 타원체의 반경인 r_c는 용적 중심의 위치와 구의 반경 및 와이어 반경의 함수로 보간(interpolation)하여 다음과 같은 다항식으로 나타낼 수 있다.

$$r_c = 1.355 z_G - 1.957(r_e^2/r_o^3) z_G^2 + 5.190(r_e^4/r_o^6) z_G^3 \tag{6}$$

위의 식들로부터 평형 상태의 구형 용적에 작용하는 스프링 힘은 다음과 같다.

$$F_s = \gamma \frac{ds}{du} = \pi\gamma r_o P_1\left(\frac{z_G}{r_o} - P_2\right) \tag{7}$$

$$P_1 = 219.5 - 1242.2(r_2/r_o) + 2345.9(r_e/r_o)^2 - 1443.5(r_e/r_o)^3$$
$$P_2 = 1.06 - 0.26(r_e/r_o)$$

위의 식(7)에 (z_G=u+z_o)의 관계를 삽입하면 스프링 힘은 다음과 같다.

$$F_s = \pi\gamma P_1 u + \pi\gamma r_o P_1 (P_2 - z_o/r_o) \quad (8)$$

식(8)의 우변에서 두번째 항의 값이 첫번째 항의 값보다 매우 작기 때문에 두번째 항을 무시할 수 있으며, 두번째 항을 무시하면 평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수는 다음과 같이 표면 장력에 비례하고 (r_c/r_o)의 다항식으로 표현된다.

$$k = \pi\gamma P_1 \quad (9)$$

용적의 부피가 주어지면, 식(9)을 이용하여 평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수를 계산할 수 있으며, Type 2에 대한 스프링 상수는 Type 1의 값과 동일하다고 가정하였다.

기존의 차원 해석 결과로부터 용적이행에서 감쇄 효과(damping effect)는 표면장력과 중력에 비해 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에[7], 본 연구에서 평형 상태에서 구형의 용적에 대한 감쇄 상수의 유도 과정은 생략하였으며, 감쇄 상수는 다음과 같다.

$$c = 3\mu \frac{V_d}{z_o^2} \quad (10)$$

이때, μ는 점성(dynamic viscosity), z_o는 구형 용적의 질량중심 위치를 나타낸다. 용적에 작용하는 힘의 성분은 전자기력, 중력 및 항력으로 구성된다.

$$F(t) = F_{emf} + F_g + F_D$$
$$F_g = \rho g V_d$$
$$F_D = C_D A_p \rho (v_g^2/2) \quad (11)$$

이때, C_D는 항력 계수 (drag coefficient), A_p는 용적의 투영 면적, v_g는 가스의 유속을 나타낸다. Fig. 2의 타원체 용적에 작용하는 축방향 전자기력은 용적

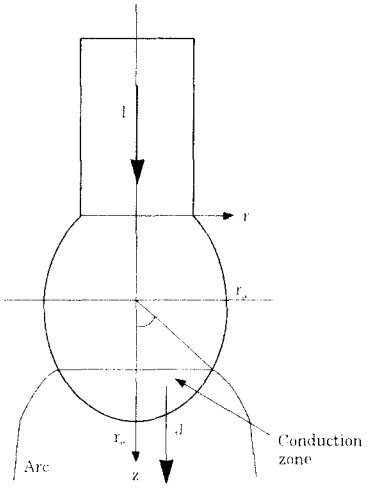


Fig. 2 Arc-covered ellipsoidal drop to calculate electromagnetic force

표면의 전류 밀도가 균일하다면 다음과 같이 적분 형태로 유도된다[8].

$$F_{emf} = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} - \mu_0 \pi \int_0^{\Phi} M_s^2(\theta)\cot(\theta)d\theta \quad (12)$$
$$\Phi = \tan^{-1}\left(\frac{r_c}{r_a}\tan\Phi\right)$$

이때, μ_0는 투자율(permeability), Φ는 용적 표면에서 아크가 덮은 부분에 해당하는 각도를 나타낸다. 식(11)의 M_s는 Type 1과 2의 타원체에서 다음과 같이 각각 M_{s1} 과 M_{s2}의 식으로 나타낼 수 있다.

$$M_{s1} = \frac{Jr_a^2}{2}\left(1 - \cos\theta\sqrt{1+e^2\sin^2\theta} - \frac{1+e^2}{e}\left(\sin^{-1}\left(\frac{e\cos\theta}{\sqrt{1+e^2}}\right) - \frac{e}{\sqrt{1+e^2}}\right)\right) \quad (13)$$

$$M_{s2} = \frac{Jr_a^2}{2}\left(1 - \cos\theta\sqrt{1+e^2\sin^2\theta} - \frac{1-e^2}{e}\left(\ln\left(e\cos\theta + \sqrt{1-e^2\sin^2\theta}\right) - \ln(e+1)\right)\right)$$

이때, $e = \sqrt{|r_c^2 - r_a^2|}/r_a$ 이며, J는 용적표면의 균일한 전류 밀도를 나타낸다. 전자기력의 유도 과정은 Jones[8]의 연구에 자세히 설명되어 있다.

DFBM에서 용적의 이탈 조건은 SFBM과 유사하며, 기존의 이탈 조건에 관성력, $F_I(=m\ddot{z}_G)$를 포함시켰다. 관성력은 힘의 방향에 따라 용적의 이탈력 또는 부착력으로 작용할 수 있으며, 이탈 조건은 다음과 같다.

$$F_\gamma + F_{emf} + F_g + F_D + F_I < 0 \quad (14)$$

용적 중심의 변위를 Runge-Kutta 방법을 이용하여 수치적으로 계산하였으며, 관성력을 포함한 이탈 조건을 적용하여 용적의 이탈 여부를 판별하고 이탈시 용적의 부피를 계산하였다. 식(9)을 이용하여 해석적으로 구한 스프링 상수와 식(3)을 이용하여 수치적으로 구한 스프링 상수를 비교하여 유도된 식의 타당성을 검증하였다. 수치 계산에서 해의 발산을 방지하기 위하여 용적의 반경이 와이어 반경의 1.1배가 될 때 까지 용적은 진동하지 않고 크기가 증가하는 것으로 하였으며, 이때의 용적 중심의 변위와 속도를 용적 진동의 초기 조건으로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

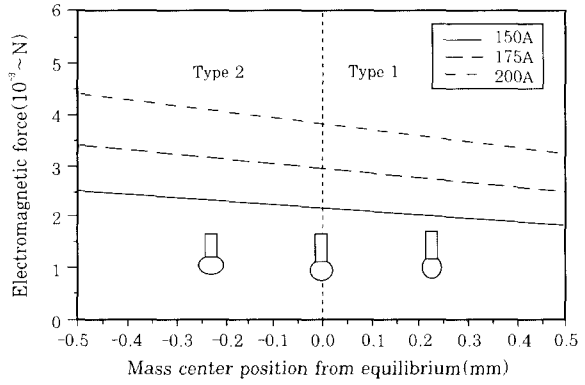
직경 1.6mm 인 강 와이어에 대하여 계산을 수행하

였으며, 계산에 사용된 재질의 물성치와 상수값을 Table 1에 나타내었다[5]. Table 1의 상수 a와 b는 98%Ar-2%O_2 조성의 분위기 가스를 사용하는 경우에 와이어 용융속도의 계산에 사용된다. 아크가 용적 전체를 덮은 경우에 전자기력을 계산한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

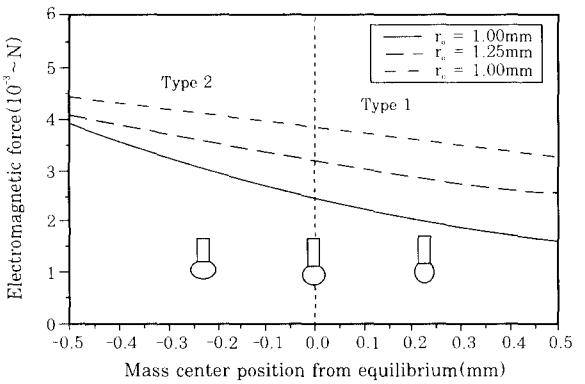
용접전류 또는 용적의 부피가 증가하면 전자기력은 증가하며, Type 2의 전자기력이 평형 상태인 구형의 전자기력 보다 크다. Type 1의 전자기력은 구형에 대한 전자기력에 비해 작으며, 일반적으로 용적은 Type 1 모드로 진동하므로 용적의 이탈시 타원체 용적에 가해지는 전자기력은 구형의 전자기력보다 작다.

Table 1 Material properties of steel and constants for calculation[5]

mass density, ρ		7.8×10^{3} kg/m^{3}
surface tension coefficient, γ		1.2N/m
viscosity, μ		2.38×10^{-6} mN s/mm^{2}
constant for wire melting, a	l_e = 26mm	0.137 mmA^{-1} s^{-1}
	l_e = 36mm	0.1342mmA^{-1}s^{-1}
constant for wire melting, b	l_e = 26mm	1.4266×10^{-5}A^{2}s^{-1}
	l_e = 36mm	1.4266×10^{-5}A^{2}s^{-1}



(a) Electromagnetic force for constant volume, r_o = 1.5mm

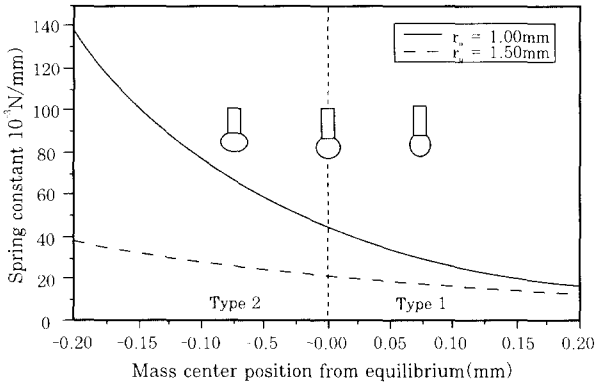


(b) Electromagnetic force for constant current I = 200A

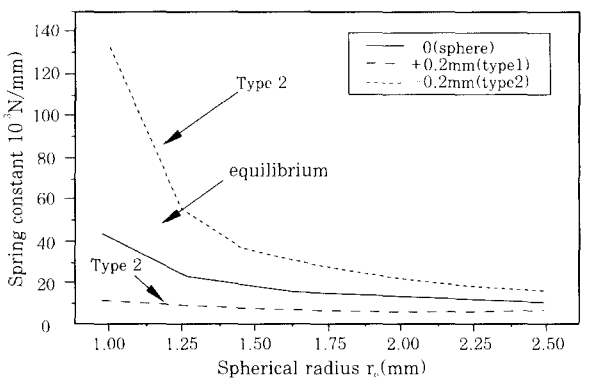
Fig. 3 Variations of electromagnetic force due to current and drop volumn

용적의 부피와 타원체의 편심이 스프링 상수에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었으며, 타원체의 스프링 상수는 식(3)을 이용하여 수치 계산하였다. Fig. 4(a)로부터 타원체의 형상이 Type 1 이거나 용적의 부피가 증가하면 스프링 상수는 감소한다. 그러므로 용적의 부피가 증가하면 스프링 상수가 감소하여 외란에 의해 용적의 움직임이 쉽게 방해 받을 수 있기 때문에 용적이행의 안정성이 감소한다. Repelled 모드에서 큰 용적이 불규칙하게 이행되는 현상은 용적 부피의 증가에 따른 안정성 감소에 기인하는 것으로 추정된다. 구형 용적의 무게 중심이 ±0.2mm 이동하여 타원체 형상으로 변화하는 경우에 용적 반경에 따라 변화하는 스프링 상수를 Fig. 4(b)에 나타내었다. 용적의 부피가 증가하면 Type 2 모드의 스프링 상수는 급격히 감소한다.

평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수는 식(9)를 이용하여 계산할 수 있다. 그러나 임의의 타원체 형상에 대한 스프링 상수는 식(3)을 이용하여 수치적으로 계산하여야 하며, 계산이 매우 용이하기 때문에 실제 스프링 상수를 계산하는 경우에 수치 계산 방법을 사용하는 것이 바람직한 것으로 생각된다. 본 연구에서는 변화하는 용적 부피와 용적 중심 위치에 대한



(a)Effect of drop mass center displacement

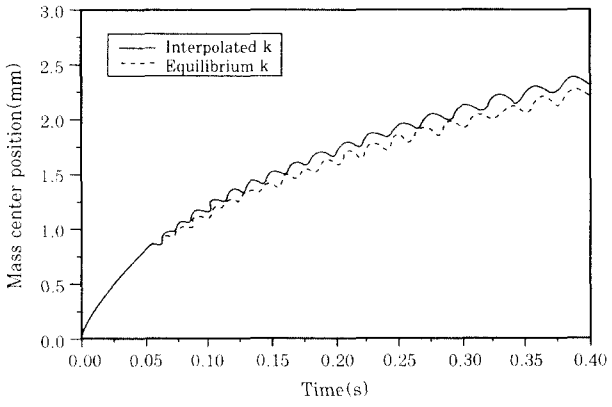


(b)Effect of drop volume

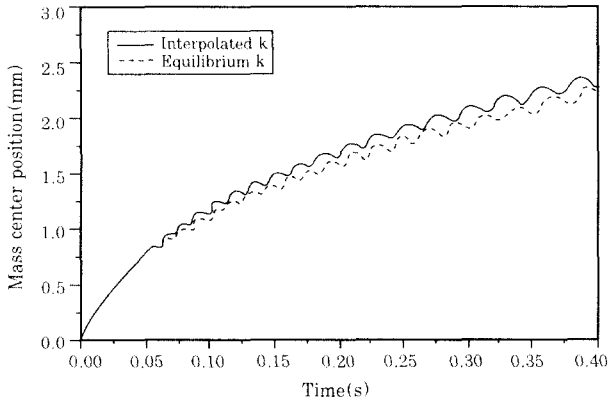
Fig. 4 Variations of spring constant due to mass center displacement and drop volume

스프링 상수를 Fig. 4(b)의 결과를 선형 보간(linear-interpolation)하여 진동 계산에 사용하였다.

Fig. 5는 전류 200A에서 선형 보간으로 얻은 스프링 상수와 식(9)의 평형 상태의 스프링 상수를 이용하여 계산한 용적의 진동 파형을 비교한 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 용적의 직경이 와이어 직경의 1.1배가 될 때까지 용적은 진동하지 않는다. 초기 상태에서 용적의 부피는 작고 스프링 상수는 크기 때문에 용적이 높은 주파수로 진동하지만, 용적의 부피가 증가하면 스프링 상수가 감소하여 진동 주파수는 감소한다. 일반적으로 선형 보간으로 얻은 스프링 상수를 이용하면 평형 상태의 스프링 상수를 이용하는 경우에 비하여 진동 주파수가 감소하고 진폭은 증가한다. 이는 용적이 Type 1 모드로 진동하고 Type 1 모드의 스프링 상수가 평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수보다 작기 때문이다. 돌출 길이에 의한 와이어 용융속도의 변화는 용적의 진동에 큰 영향을 주지 못한다. 펄스 전류를 이용하여 용적을 가진 시키고 공진 주파수를 측정한 결과[3]와 동일한 조건에서 계산한 결과를 Table 2에 비교하였다. 계산으로 구한 진동 주파수는 실험 결과보다 높으며, 용적의 크기가 감소함에 따라 주파수가 증가한다. 계산 결과는 실험 결과와 비교하여 10-40%의 오차가 발생하지만, 전반적인 추세가 일치하며, 이와 같은 오차의 크기는 Jones[3]의 결과와 유사하다.



(a) Drop vibration for wire extension of 26mm



(b) Drop vibration for wire extension of 36mm

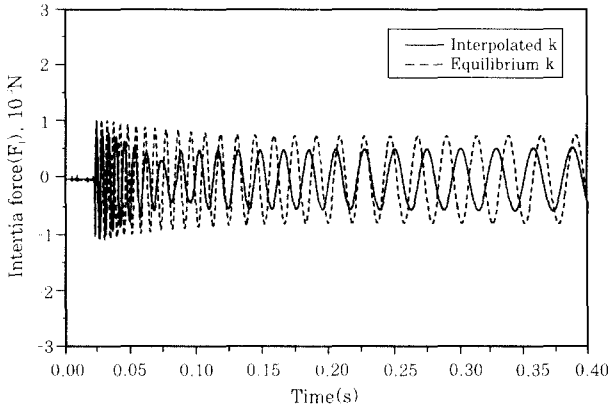
Fig. 5 Drop vibration for equilibrium and interpolated spring constants at 200A

Fig. 6은 관성력의 변화를 나타내며, 평형 상태의 스프링 상수를 사용하는 경우의 관성력이 선형 보간한 스프링 상수를 사용하는 관성력에 비하여 크다. 이는 평형 상태의 스프링 상수를 사용하면 진동 주파수가 증가하며, 관성력은 주파수의 자승에 비례하기 때문이다. 돌출 길이는 용적의 진동과 유사하게 관성력에 큰 영향을 주지 못한다.

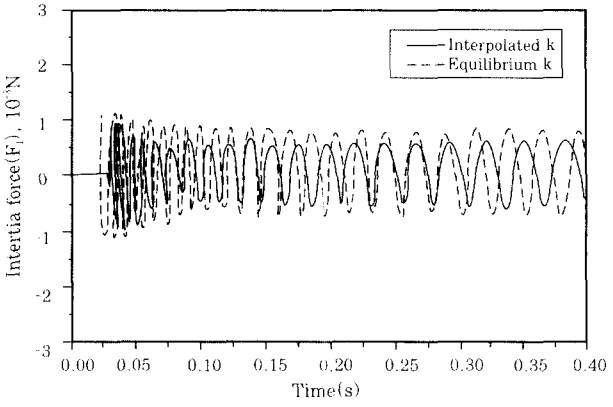
돌출 길이가 36mm이고 가스의 유속이 10m/s인 조건에서 용적 이탈시 용적에 작용하는 힘의 크기를

Table 2 Comparison of calculated and experimental resonance frequencies

drop volume(mm^3)	exp.freq.[3](Hz)	cal.freq.(Hz)
10.2	70	90
9.5	69	95
5.0	109	121



(a) Intertia force for estension of 26mm



(b) Intertia force for estension of 36mm

Fig. 6 Variation of intertia force for equilibrium and interploated spring constants at 200A

Fig. 7에 비교하였다. 저전류 영역에서 중력의 영향이 가장 크고, 관성력의 크기는 항력과 비슷하다. 전류가 증가하면 이탈 용적의 부피가 감소하므로 중력의 영향은 감소하고 전자기력과 관성력이 증가한다. 전류가 240A 이상 증가하면 관성력은 중력보다 커지며, 천이 전류인 270A에서 관성력의 크기는 대략 전자기력의 반이 된다. 전류를 275A 이상 증가시키면 용적의 크기가 작아져서 가정한 타원체 형상을 얻을 수 없으므로 해가 발산한다. 그러므로 본 연구에서 제안한 방법을 스프레이 모드에 적용할 수 없다. 평형 상태의 스프링 상수와 선형 보간한 스프링 상수를 사용하여 계산한 결과가 비슷하기 때문에 평형 상태의 스프링 상수를 사용하여도 용적의 거동을 예측할 수 있을 것으로 추정된다.

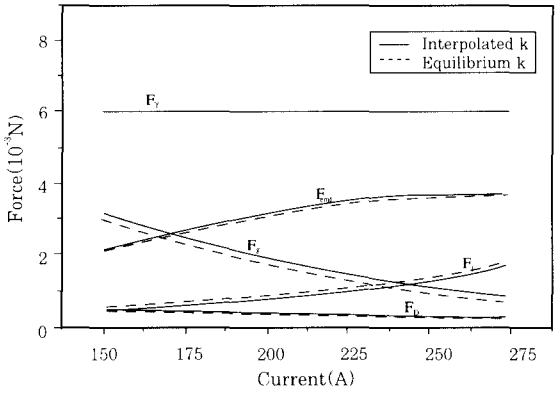


Fig. 7 Comparison of force components at drop detachment for l_e=36mm (F_γ=surface tension, F_{emf}=electromagnetic, F_g=gravitational, F_D=drag, F_I=inertia force)

DFBM, SFBM, PIT를 이용하여 예측한 용적의 크기를 실험 결과 4)와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다. SFBM은 구형의 용적에 대하여 전자기력을 계산하였으며, 구형에서의 전자기력은 DFBM의 Type 1 모드의 타원체에서 계산된 전자기력에 비해 크다. 그러나 DFBM로 계산된 이탈 용적의 크기는 SFBM의 용적 크기에 비하여 작게 계산되며, 이는 DFBM에서 관성력의 영향을 포함하기 때문이다. DFBM은 SFBM에 비하여 실험 결과를 정확하게 예측할 수 있지만, 전류가 200A 이상 증가하면 실험 결과와 비교하여 오차가 증가한다. 오차의 주된 원인으로 용적 내의 유동에 의한 관성력이 포함되지 않기 때문인 것으로 추정된다. 또한, 용적 이탈시 전체 용적이 이탈하는 것으로 가정하였지만 실제의 경우에는 일부가 용접봉에 부착하기 때문에 오차가 발생한다. 본 모델은 275A 이상의 전류에서 DFBM의 해가 발산하기 때문에 초기 스프레이 모드인 프로젝티드(projected) 모드까지만 적용이 가능하다. 그러므로 오차를 감소시키고 적용범위를 넓히기 위한 모델의 보완이 필요하다. 본 연구에서 제안한 DFBM의 해석 방법은 용접봉의 기계적 진동 시스템이나 용적이행의 안정성을 해석하는데 활용할 수 있을 것으로 예상된다.

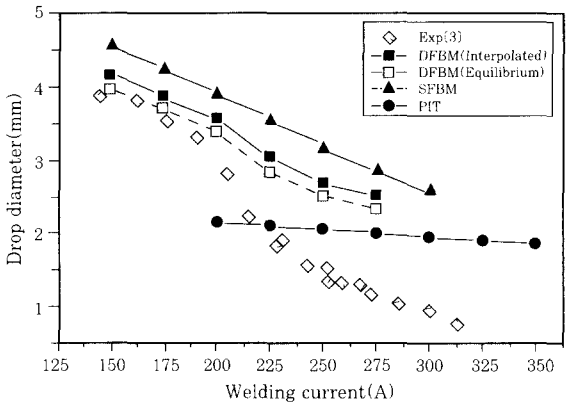


Fig. 8 Comparison of drop diameters predicted by DFBM, SFBM and PIT with experimental result of extension of 36mm

4. 결 론

GMA 용접에서 발생하는 용적이행의 거동을 해석하기 위하여 2차 시스템으로 모델링한 동적 힘 평형 모델을 제안하였으며, 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 평형 상태의 구형 용적에 대한 스프링 상수를 유도하였으며, 임의의 타원체 용적에 대해 수치적으로 계산한 스프링 상수와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2) 용적은 Type 1 모드로 진동하며, 이 모드에서 전자기력과 스프링 상수는 평형 상태의 구형에 비하여 작아진다.

3) 용적의 크기가 증가하면 스프링 상수가 감소하기 때문에 용적이행의 안정성이 감소한다. 이와 같은 용적이행의 안정성 감소는 repelled 모드에서 큰 용적이 불규칙적으로 비산하는 원인으로 추정된다.

4) 저전류 영역에서 관성력의 크기는 항력과 비슷하지만, 전류가 증가하면 관성력이 중력보다 커지며 천이전류 부근에서 전자기력의 반에 도달한다. 그러므로 고전류 영역에서 관성력은 금속이행에 상당한 영향을 미친다.

5) DFBM는 SFBM와 비교하여 실험 결과를 정확하게 예측하였지만, 실험 결과와 상당한 오차가 발생하였다. 이와 같은 오차는 용적 내부의 유동에 의한 관성력을 고려하지 못하였기 때문에 발생한 것으로 생각

된다. 오차를 감소시키고 스프레이 모드에서 적용할 수 있도록 DFBM에 대한 추가의 보완이 필요하다.

후 기

본 연구는 BK 사업의 일환으로 포항 종합제철 주식회사의 지원을 받았으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. J.F. Lancaster: The Physics of welding, Pergamon, 1985
2. J.C. Amson: Lorentz force in the molten tip of an arc electrode, Br. J. Appl. Phys., 16(1965), 1169-1179
3. L.A. Jones, T.W. Eagar, J.H. Lang: A dynamic model of drops detaching from a gas metal arc welding electrode, J. of Phys. D: Appl. Phys., 31(1998), 107-233
4. 최상균, 유중돈, 박상규: Pulsed-GMAW 공정의 금속이행에 관한 동적해석, 대한용접학회지, 15-5(1997), 84-91
5. Y.-S. Kim, T.W. Eager: Analysis of metal transfer in gas metal arc welding, Weld. J., 72 (1993), 269s-278s
6. S. Timoshenko, D.H. Young, W. Weaver: Vibration problems in engineering, Wiley, 1974
7. 최상균, 유중돈: 차원해석을 통한 GMA 용접의 금속이행 현상에 관한 분석, 대한용접학회지, 17-1(1999), 8-16
8. L.A. Jones, T.W. Eagar, J.H. Lang: Magnetic forces acting on molten drops in gas metal arc welding, J. of Phys. D: Appl. Phys., 31(1998), 93-106