研究論文

GTA 용접에서 용융풀의 표면 변형이 유동과 진동에 미치는 영향

고 성 훈* · 최 상 균** · 유 중 돈*

* 한국과학기술원 기계공학과

** 영남대학교 공과대학 기계공학부

Effects of Surface Depression on Pool Convection and Oscillation in GTAW

S.H. Ko*, S.K. Choi** and C.D. Yoo*

* Dept. of Mechanical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejon 305-601, Korea

** School of Mechanical Engineering, Yeungnam University, Kyungbuk 712-749, Korea

Abstract

Surface depression in the arc welding is calculated numerically to analyze its influence on pool convection and oscillation. The magnitude of surface depression due to arc pressure on the stationary GTA pool surface is relatively small, and fluctuations of the surface and velocity are caused mainly by arc pressure. The inward flow on the surface due to the electromagnetic force and positive surface tension gradient acts to decrease surface depression. Surface depression appears to have minor effects on average flow velocity and thus pool geometry. Pool oscillation occurs due to surface vibration, and oscillation frequencies are affected mainly by the surface tension and pool width. The input parameters such as arc pressure and current have negligible effects on the oscillation frequency, and the surface tension gradient has limited effects. Since the oscillation frequency varies slightly according to penetration, pool oscillation for the partial penetration weld pool is applicable to monitor the pool width.

(Received June 24, 1999)

Key Words : Arc welding, Surface depression, Pool convection and oscillation, Partial penetration, Arc pressure, Surface tension gradient, Oscillation frequency

1. 서 론

아크 용접에서 비드 폭과 용입에 영향을 주는 용융풀의 유동은 전자기력, 부력, 표면장력 구배 (surface tension gradient)에 의한 Marangoni 유동 및 플라즈마 (plasma)에 의한 drag 힘 등의 다양한 요소에 의하여 결정된다[1-6]. 이 중에서 전자기력과 Marangoni 유동이 용접부 형상에 큰 영향을 주며, 전자기력에 의한 유동은 풀의 아래 방향으로 향하게 되므로 용입을 증가시킨다[2]. 온도 변화에 따른 표면장력 구배에 의하여 발생하는 Marangoni 유동은 모재의 황 성분 등에 따라 유동의 방향이 변화하며, 유동의 방향은 용융부의 형상에 영향을 미친다[3,4].

이와같은 용융풀의 유동 현상을 해석하기 위하여 주로 수치 계산 방법이 사용되며, 기존의 연구에서는 수치해석을 단순화시키기 위하여 용융풀의 표면을 평편하거나 평형상태에서 변형된 형상으로 가정하였다[4,5]. 평형상태의 표면 변형은 Lin[6] 등에 의하여 제안된 방법이 주로 사용되었으며, 계산으로 구한 표면 변형은

GTA 용접실험 결과보다 작았다. 표면 변형의 가정과 무관하게 아크 용접에서 기존의 수치 계산 결과는 실험 결과와 대부분 일치하므로[7] 표면 변형이 용융풀의 대류에 미치는 영향은 그리 크지 않을 것으로 추정되지만, 실제 표면 변형을 고려한 해석은 이루어지지 못하였다. 용융풀의 진동(pool oscillation)은 펄스 전류 등의 외란에 의하여 용융풀이 고유 진동수로 진동하는 현상으로서 진동수를 측정하여 용융풀의 크기와 용입상태를 제어하는데 응용되고 있다[8]. 용융풀의 진동 현상을 해석하기 위하여 membrane, surface wave, 에너지 모델 등의 다양한 해석 방법이 제시되었지만, 동적 모델을 이용한 정확한 해석은 이루어지지 못하였다[8~10].

본 연구에서는 용접시 일어나는 용융풀의 진동이 용융풀 거동에 미치는 영향을 동적 모델을 통하여 계산하고, 용융풀 표면 변형과 내부 유동에 사이의 관계를 밝혀 용융풀의 거동을 더 정확히 예측하고자 한다. 수치해석 방법을 이용하여 정지 상태의 GTA 용융풀에 대한 유동 해석과 열 해석을 수행하였으며, 해석 결과로부터 용융풀의 표면 변형이 유동과 진동에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 용융풀의 열 유동 해석

자유표면을 포함하는 용융풀의 유동을 계산하기 위하여 Volume of Fluid (VOF) 방법을 사용하였으며, VOF 방법에 관한 자세한 사항과 계산 과정은 기존의 연구[11]에서 자세히 기술하였으므로 여기에서는 간략하게 설명하기로 한다. 정지 상태의 용융풀에 대한 유동 해석을 위하여 다음과 같이 가정하였다. (1) 축대칭 용융풀은 비압축성 층류 (laminar) 유동이며, (2) 아크의 drag force에 의한 영향은 고려하지 않으며, (3) 용융 금속의 물성치는 표면장력 계수를 제외하고는 일정하다. VOF방법은 계산 영역을 셀(cell)로 나누고, 셀에 존재하는 유체의 부피 비율을 나타내는 함수 F를 정의하여 자유 표면을 기술한다. 계산에 사용되는 지배 방정식은 연속식, Navier-Stokes 식 및 함수 F와 관련된 아래의 수식으로 구성된다.

$$\nabla \cdot v = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v \cdot \nabla)v = -\frac{1}{\rho}\nabla p + \nu\nabla^2 v + \frac{f}{\rho} \tag{2}$$

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (v \cdot \nabla)F = 0 \tag{3}$$

이때, v는 유속, ρ는 밀도, ν는 점성, f는 체력 (body force)을 나타내며, 아크 용접에서 발생하는 전자기력은 식(2)의 체력에 포함된다.

아크열과 Joule 열에 의한 용융풀의 온도는 energy 식을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있으며, hybrid differencing schemes을 사용하여 계산하였다[12].

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t} + v \cdot \nabla T\right) = k\nabla^2 T + \dot{q}_j \tag{4}$$

이때, T는 온도, C_p는 비열(heat capacity), k는 열전도율(thermal conductivity), $\dot{q}_j$는 용융풀에서 Joule열에 의해 발생하는 단위 체적당 열량을 나타낸다. 잠열(latent heat)의 효과는 아래의 식과 같이 용융 온도 구간에서 모재의 비열을 높여 고려하였다.

$$C_p^* = \frac{\Delta H}{(T_{liq} - T_{sol})} + C_p,\ T_{sol} < T < T_{liq} \tag{5}$$

이때, C_p^*는 용융 구간에서의 비열, H는 잠열을 나타낸다.

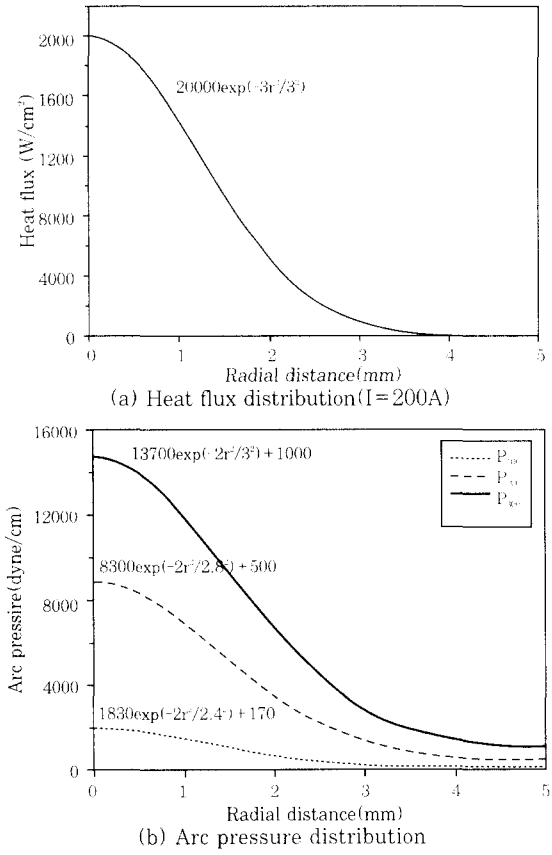
아크에 의하여 용융풀에 가해지는 아크열과 전류밀도의 분포를 Fig.1(a)와 같이 Gaussian분포로 가정하여 용융풀의 자유 표면에 경계 조건으로 부과하였다. 온도 변화에 따른 표면장력 구배인 $(\partial\gamma/\partial T)$에 의하여 발생하는 Marangoni 유동은 용융풀 표면에서 아래 식의 전단 응력을 부가하여 고려하였다.

$$\tau = \left(\frac{\partial \gamma}{\partial T}\right)\left(\frac{\partial T}{\partial r}\right) \tag{6}$$

용접전류가 100, 200, 300A인 경우에 용융풀 표면에 가해지는 아크 압력인 P_{100}, P_{200}, P_{300}은 Fig.1(b)에 보인 바와 같이 Gaussian 분포이며, 기존의 실험 결과를 사용하였다[6]. 초기 조건으로 용융풀의 유속은 0으로 하였으며, 중심축을 따라 free-slip조건을, 고액

Table 1 Material properties of mild steel used for calculation

Mass Density, ρ	7860 (kg/m^3)
Kinematic Viscosity, ν	5.6×10^{-7} (m^2/s)
Surface Tension Coefficient, γ	1.2, 1.8 (N/m)
Surface Tension gradient, dγ/dT	$\pm4.9\times10^{-4}$ (N/mK)
Electrical Conductivity, σ_e	8.54×10^{5} (mho/m)
Permeability, μ_o	$4\pi\times10^{-7}$ (H/m)
Thermal Conductivity, k	30 (W/mK)
Specific Heat, C_p	795 (J/kgK)
Latent Heat of Fusion, ΔH	272 (kJ/kg)
Liquidus Temperature, T_{liq}	1809 (K)
Solidus Temperature, T_{sol}	1789 (K)



(a) Heat flux distribution(I=200A)

(b) Arc pressure distribution

Fig.1 Heat flux and arc pressure distributions on weld pool surface

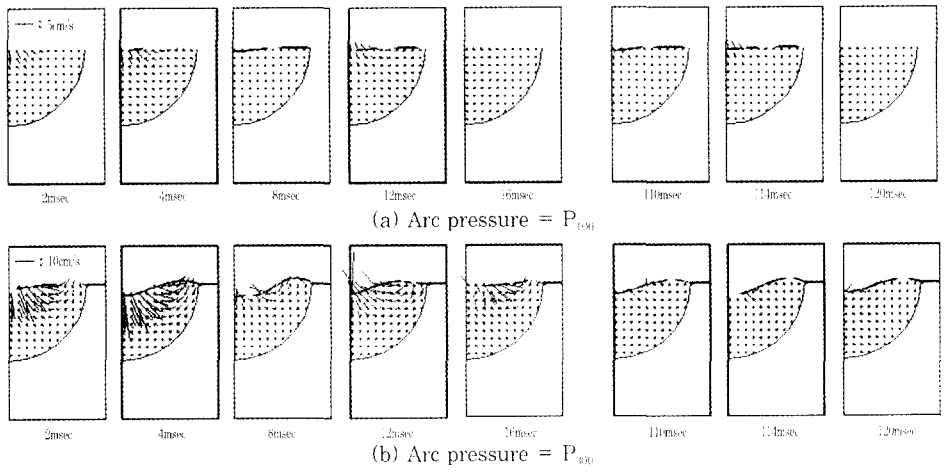
경계면을 따라 no-slip 조건을 부가하였다. 유동 해석에 사용된 물성치는 Table.1과 같다[1,14].

3. 결과 및 고찰

3.1 용융풀의 표면 변형 및 유속

용융풀에 작용하는 아크 압력, 전자기력, 표면장력이 용융풀의 표면 변형과 유동에 미치는 영향을 해석하기 위하여 용융풀을 반구형으로 가정하여 계산하였다. 용융풀 표면에 P_{100}과 P_{300}의 압력이 가해지는 경우에 표면 변형과 유동을 계산하여 Fig.2에 나타내었다. 계산에 사용된 표면장력은 1200dyne/cm이고 전자기력과 Marangoni 유동은 고려하지 않았으며, 유속은 용융풀 중심축에서의 축방향 속도의 평균값을 나타낸다. 아크 압력이 P_{100}으로 작은 경우에 표면 변형과 유속의 변화가 거의 없지만, 압력이 P_{300}으로 증가하면 표면 변형과 유속이 증가하였다.

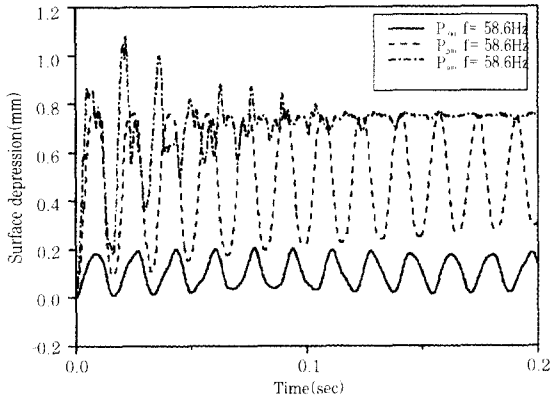
Fig.2의 조건에서 시간에 따라 변화하는 용융풀 중심에서의 표면 변형과 축방향 평균 유속을 Fig.3에 나타내었다. Fig.3(a)에 나타난 바와 같이 아크 압력이 P_{100}인 경우의 표면 변형은 0.2mm이하로 매우 작으며, P_{200}의 경우 초기의 최대 변형은 0.8mm로 증가하였다. P_{100}과 P_{200}의 결과가 시간 변화에 대해 표면 변형의 진폭이 거의 일정하며 진동이 유지되지만, 압력이 증가한 P_{300}의 경우에는 진폭이 급속히 감소하여 0.1sec 이후 정상상태에 도달하며 이때의 표면 변형은 0.8mm이다. 이는 높은 압력이 표면 변형을 억제하는 구속력으로 작용하기 때문이다. 아크 압력에 따른 풀 중심에서 축방향 평균 유속의 변화를 Fig.3(b)에 나타내었다. P_{100}과 P_{200}의 경우 유속은 규칙적으로 진동하며, P_{100}의 경우 유속의 범위는 ±1cm/s이지만 P_{200}의 경우 유속은 대략 ±4cm/s로 증가한다. P_{300}의 경우 초기의 유속은 크게 증가하지만 시간이 경과하면 유속은 감소하고 불규칙적으로 진동한다. 표면 변형과 유속의 진동은 매우 유사하며, 유속은 아크 압력에 의한 용융풀의 표면 변형에 의하여 발생한다. 용융풀 표면 변형의 계산 결과는 Lin[6] 등에 의한 평형 상태의 변형보다 작으며, 이는 표면 변형에 의하여 발생한 유동이 표면 변형이 커지는 것을 방해하기 때문이다.



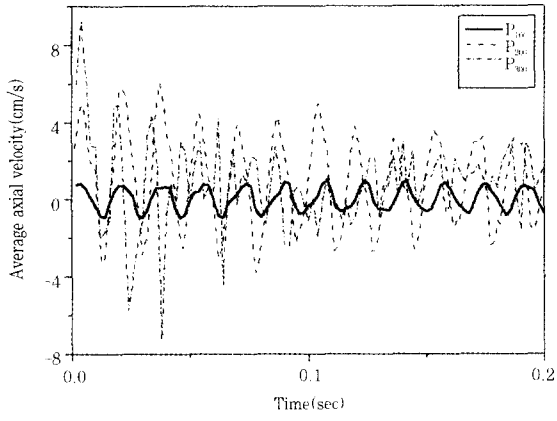
(a) Arc pressure = P_{100}

(b) Arc pressure = P_{300}

Fig. 2 Surface depression and convection patterns for P_{100} and P_{200} (I= 0A, γ=1200dyne/cm)

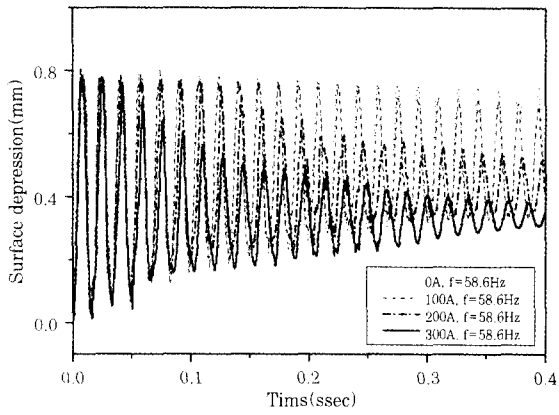


(a) Surface depression

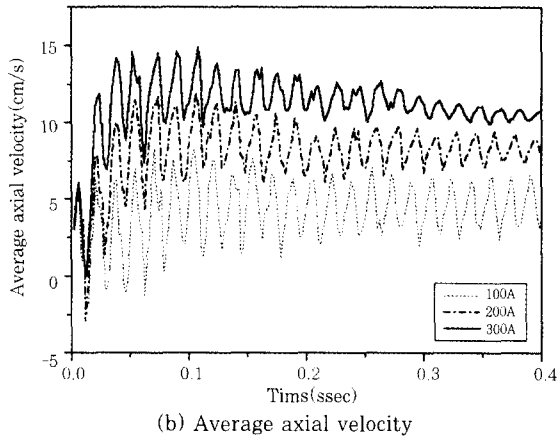


(b) Average axial velocity

Fig. 3 Variations of surface depression and axial velocity due to arc pressure (I=0A, γ=1200dyne/cm)



(a) Surface depression



(b) Average axial velocity

Fig.4 Variations of surface depression and axial velocity due to current ($P=P_{200}$)

아크 압력을 P_{200}으로 고정하고 전류를 변화시킬 때 용융풀의 표면 변형과 축방향 유속의 변화를 Fig.4에 나타내었다. 아크용접에서 전류는 전자기력을 발생시키며, 전자기력에 의하여 용융풀 표면의 외곽에서 중심으로 향하는 반시계 방향의 회전 유동이 발생한다. Fig.4(a)에 나타난 바와 같이 100A의 저전류인 경우에 표면 변형은 전류에 의해 영향을 받지 않는다. 그러나, 전류가 증가하면 표면 변형이 감소하는데, 이는 전자기력이 증가함에 따라 용융풀 표면의 외곽에서 중심으로 향하는 유속이 증가하여 중심 부근의 체적이 증가하기 때문이다. 전류 변화에 따른 용융풀의 중심축에서 축방향의 유속을 Fig.4(b)에 나타내었다. 아크 압력만 작용하는 Fig.3(b)의 결과와 비교하면, 유속의 진동 현상은 유사하지만, Fig.4(b)의 경우에는 유속의 평균값은 전류의 증가에 따라 증가한다. 그러므로 전류가 증가하면 용융풀 표면에서 중심부로 향하는 유속이 증가하므로 표면 변형이 감소하며, 유속의 진동은 주로 표면 변형에 의하여 발생하고 유속의 평균값은 전자기력에 의하여 결정된다.

일정한 아크 압력 P_{200}과 전류 200A에서 표면장력을 1200과 1800dyne/cm로 변화하는 경우에 용융풀의 표면 변형과 축방향 유속을 Fig.5에 나타내었다. 표면장력이 증가하면 표면을 변형시키는데 큰 압력이 필요하기 때문에 Fig.5(a)에 보인 바와 같이 표면 변형의 진폭이 감소하였다. 그러나 Fig.5(b)에 나타난 바와 같이 표면장력이 변화하여도 유속은 크게 변화하지 않았다. 그러므로 표면장력의 변화는 용융풀의 표면 변형에 영향을 주지만 유속에는 영향을 주지 못한다.

아크 압력 P200, 전류 200A 인 경우에 표면장력 구배로 ±0.49dyne/cmK를 사용하여 Marangoni 유동이 용융풀 표면 변형과 유속에 미치는 영향을 계산한 결과를 Fig.6에 나타내었다. 표면장력 구배가 음의 값인 경우 (Fig.6(a)), Marangoni 유동에 의해 용융풀 표면의 중심에서 외곽으로 향하는 시계 방향의 회전 유동이 발생하고, 내부에서는 전자기력에 의해 반시계 방향의 회전 유동이 발생한다. 표면장력 구배가 양의 값인 경우 (Fig.6(b)), Marangoni 유동의 방향과 전자기력에 의한 유동의 방향이 동일하므로 반시계 방향의 회전 유동이 발생하며 유속이 증가한다.

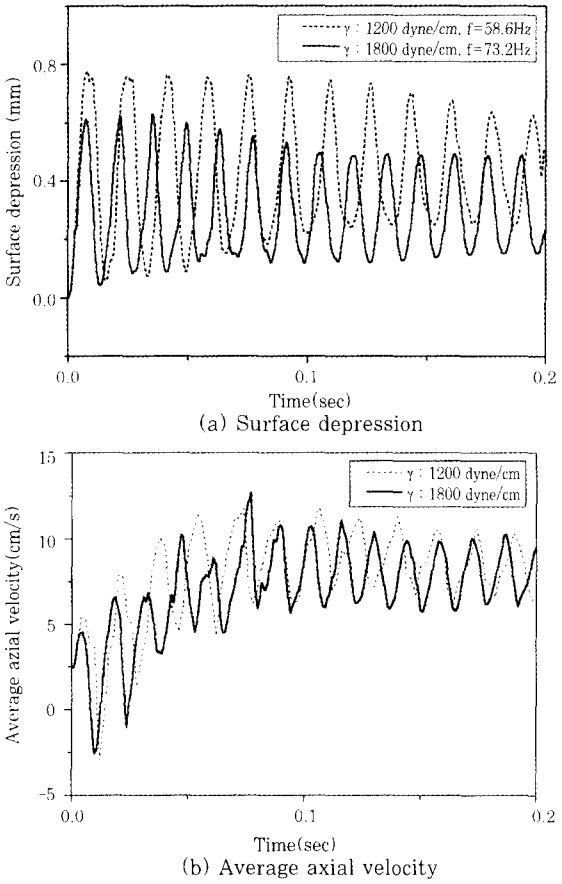


Fig. 5 Variations of surface depression and axial velocity due to surface tension ($P=P_{200}$, I=200A)

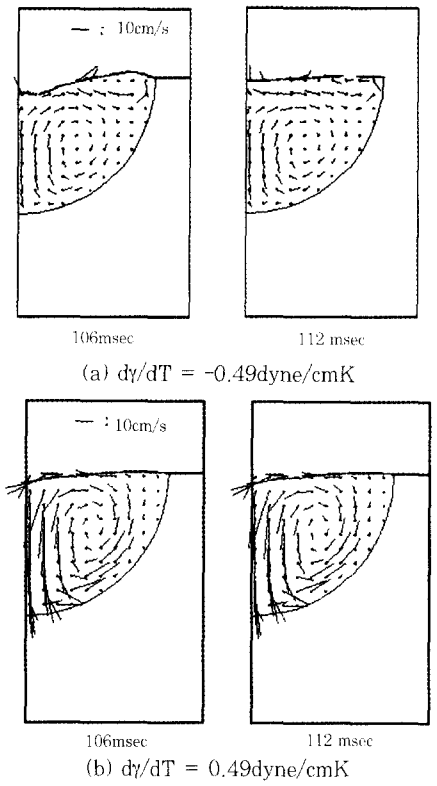
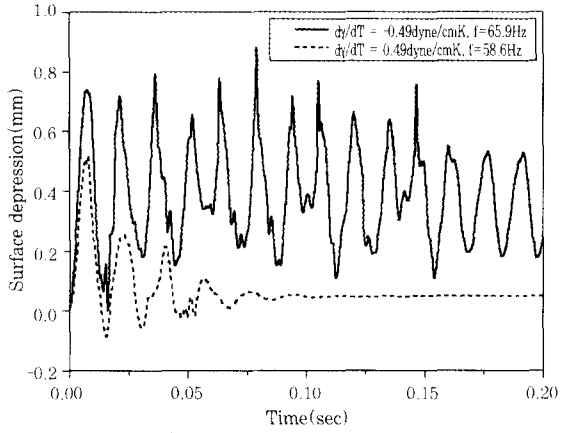


Fig. 6 Surface depression and convection patterns due to surface tension gradient ($P=P_{200}$, I=200A)

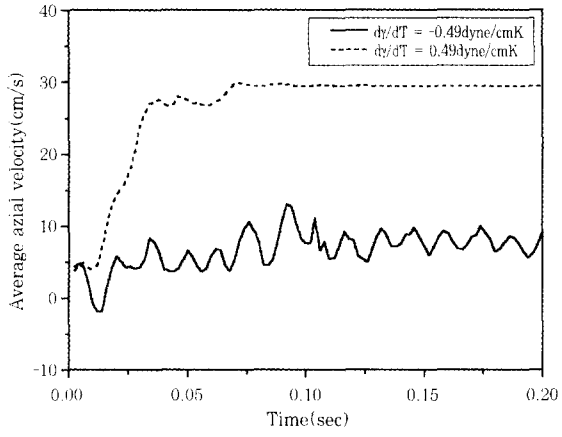
Fig.6과 동일한 조건에서 시간에 따른 용융풀 중심의 표면 변형과 축방향 유속은 Fig.7에 나타난 바와 같이 Marangoni 유동에 크게 영향을 받는다. 표면장력 구배가 0.49dyne/cmK인 경우, 용융풀 표면에서 중심으로 향하는 유속이 증가하므로 표면 변형이 급속히 감소하고 100msec이후에는 진동이 없는 정상 상태에 도달한다. 표면장력 구배가 -0.49dyne/cmK인 경우에는 표면에서 외곽으로 향하는 Marangoni 유동이 전자기력에 의한 유동을 상쇄시키므로 표면 변형이 증가한다. 축방향 평균 유속의 변화는 Fig.7(b)에 나타난 바와 같이 표면장력 구배가 0.49dyne/cmK인 경우에 Marangoni 유동과 전자기력에 의한 유동의 방향이 동일하므로 축방향 유속이 급속히 증가하였다. 표면장력 구배가 -0.49dyne/cmK인 경우에 Marangoni 유동이 전자기력에 의한 유동을 상쇄시키는 역할을 하므로 축방향 유속은 감소하였다.

용융풀의 반경과 용입이 표면 변형과 유속에 미치는 영향을 Fig.8과 9에 나타내었다. 용입을 5mm로 고정시키고 용융풀의 반경을 변화시키면, 반경이 작을수록 표면 변형이 작고 진폭이 빠르게 감소한다 (Fig.8(a)). 이는 용융풀의 반경이 작으면 동일한 표면 변형에 대해서 곡률이 증가하여 표면을 변형시키는데 큰 압력이 요구되기 때문이다. 그러나 표면 변형에 비하여 축방향 유속은 반경 변화에 크게 영향을 받지 않지만, 반경이 증가하면 유속이 약간 증가한다 (Fig.8(b)). 용융풀의 반경을 5mm로 고정하고 용입을 변화시키면 Fig.9에 나타난 바와 같이 용입이 5mm 이상 증가하는 경우에 표면 변형의 양상은 매우 유사하다. 용입이 2.5mm로 작은 용융풀에서 표면 변형의 진폭은 용입이 5mm 이상인 경우보다 작아지며, 이는 용입이 작으면 점성에 의한 마찰력이 증가하기 때문이다. Fig.9(b)에 나타난 바와 같이 용입이 증가하면 축방향 평균 속도는 증가하였다. 용입이 증가할수록 용융풀에 작용하는 축방향 전자기력이 증가하므로 유속이 증가하는 것으로 추정된다. 계산 결과로부터 용융풀의 반경 변화는 주로 표면 변형에 영향을 미치며, 용입은 주로 유속에 영향을 미친다.

압력이 P_{200}, 전류가 200A, 표면장력 구배가 ± 0.49dyne/cmK인 경우에 대하여 열해석을 포함한 정상 상태의 용융풀 형상을 Fig.10에 나타내었다. 표면장력 구배가 -0.49dyne/cmK이면, 외곽으로 향하는 Marangoni 유동에 의하여 용융풀의 반경은 증가하고 이와같은 유동이 전자기력에 의한 축방향 유속을 감소시키므로 용입은 작아진다. 표면장력 구배가

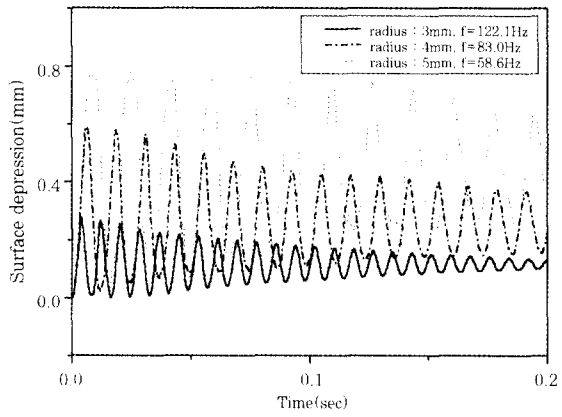


(a) Surface depression

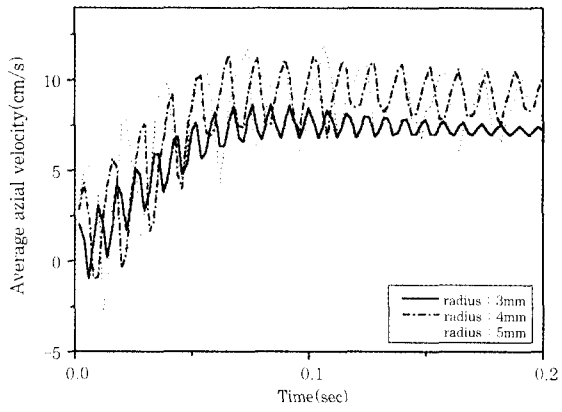


(b) Average axial velocity

Fig. 7 Variations of surface depression and convection due to surface tension gradient ($P=P_{200}$, I=200A)



(a) Surface depression



(b) Average axial velocity

Fig. 8 Effects of pool radius on surface depression and axial velocity (Penetration=5mm, $P=P_{200}$, I=200A, γ=1200dyne/cmK)

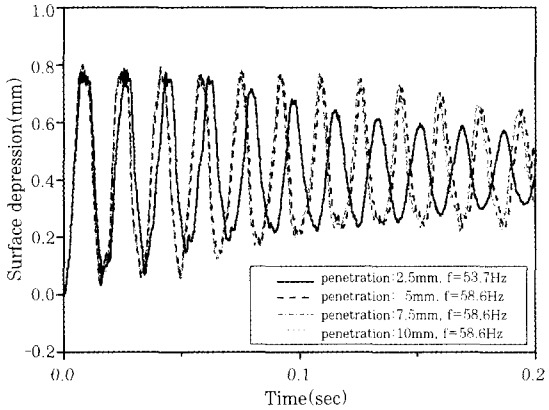
0.49dyne/cmK이면, 내부로 향하는 Marangoni 유동과 전자기력에 의한 유동의 방향이 동일하므로 용융풀의 반경은 감소하고 축방향 유속을 증가시키므로 용입은 증가한다. 이와같은 계산 결과는 기존의 해석 결과와 유사하다[4].

3.2 부분 용입 풀의 진동

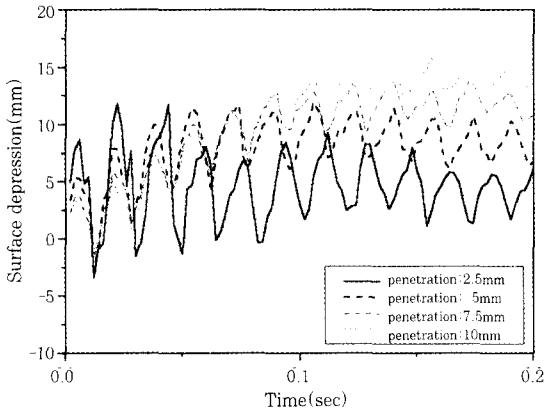
용융풀의 진동 주파수는 공진 진동수 (resonant frequency)이지만, 용융 금속의 점성에 의한 감쇄 (damping) 효과가 작기 때문에 고유 진동수와 유사한 값을 갖게 된다. 아크 압력이 변화하는 경우에 Fig.3(a)의 용융풀 표면의 진동수를 Fourier 변환을 이용하여 계산하면 아크 압력과 무관하게 58.6Hz이다. P_{300}의 경우에는 높은 아크 압력이 표면의 진동을 방해하므로 압력이 낮은 경우에 비하여 노이즈 (noise) 성분이 증가하였다. 동일한 형상의 용융풀에 대하여 전류를 변화시킨 Fig.4(a)의 진동 주파수도 58.6Hz로 동일하다. 이는 아크 압력이나 전류는 입력변수이므로 용융풀의 형상이 동일하면 진폭에는 영향을 미치지만 고유 진동수에는 영향을 미치지 못하기 때문이다.

표면장력이 1200과 1800dyne/cm인 경우 (Fig.5(a)), 진동 주파수는 각각 58.6과 73.2Hz이다. 표면장력은 스프링과 동일한 효과를 나타내므로 표면장력이 증가하면 주파수는 증가한다. 표면장력 구배에 의한 Marangoni 유동의 영향은 Fig.7(a)에 보인 바와 같이 표면장력 구배가 -0.49와 0.49dyne/cmK인 경우에 용융풀은 각각 65.9와 58.6Hz로 진동하였다. 표면장력 구배가 음의 값인 경우에 진동 주파수가 증가하는 것은 표면장력 구배에 의하여 식(6)과 같이 용융풀 표면의 중심에서 외곽으로 향하는 전단응력이 작용하므로 박판의 표면을 잡아 당기는 것과 동일한 효과를 내기 때문인 것으로 추정된다.

용융풀의 형상은 진동 주파수에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으며, 용융풀의 반경은 Fig.8(a)에 보인 바와 같이 반경이 증가하면 주파수는 감소한다.

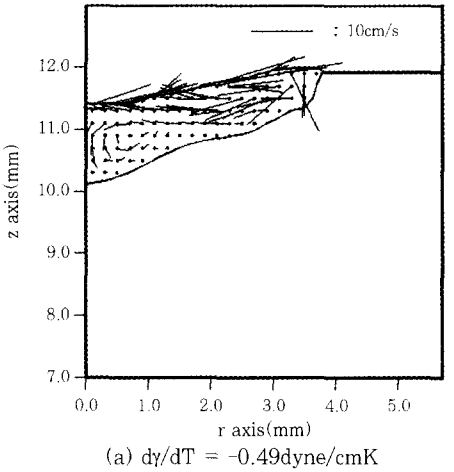


(a) Surface depression

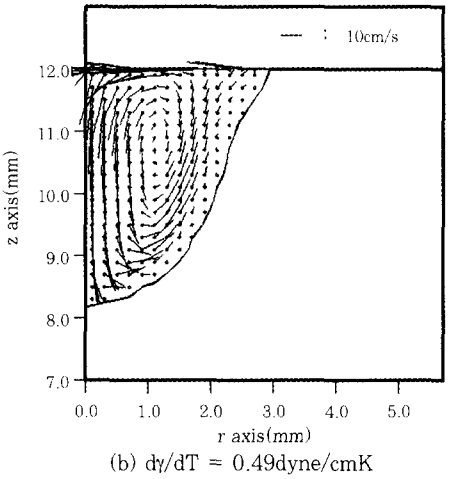


(b) Average axial velocity

Fig. 9 Effects of penetration on surface depression and axial velocity (Pool radius=5mm, $P=P_{200}$, I=200A, γ=1200dyne/cm)



(a) $d\gamma/dT$ = -0.49dyne/cmK



(b) $d\gamma/dT$ = 0.49dyne/cmK

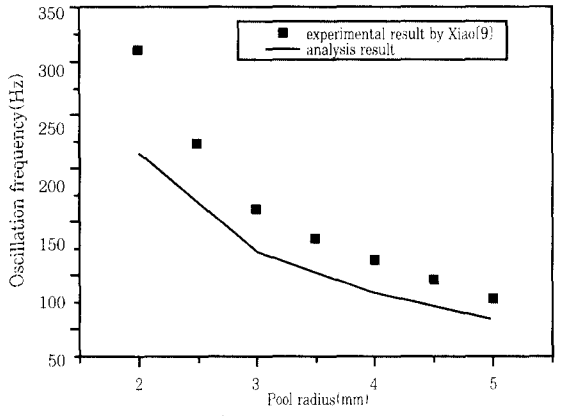
Fig.10 Molten pool profiles with surface tension gradient ($P=P_{200}$, I=200A)

Xiao[9] 등이 mild steel과 아르곤 보호가스를 사용하여 25Hz의 펄스 전류로 가진한 실험결과와 비교하면 Fig.11(a)에 나타난 바와 같이 계산결과는 실험결과를 비교적 정확하게 예측하였다. 용입이 주파수에 미치는 영향은 Fig.9(a)과 11(b)에 나타난 바와 같이 반경의 경우와 상당히 다른 양상을 보인다. 용입이 용융풀의 반경보다 작아지면 풀의 고액 경계면에서 점성에 의한 마찰력이 유체 흐름을 방해하기 때문에 용입이 감소하면 진동 주파수가 감소하게 된다. 용입이 풀의 반경 정도로 증가하면 고액 경계면의 마찰력이 표면 부근의 유동에 미치는 영향이 감소하므로 주파수는 거의 일정하게 되며, 이와같은 추세는 surface wave를 이용한 원통의 고유 진동수와 일치한다[13].

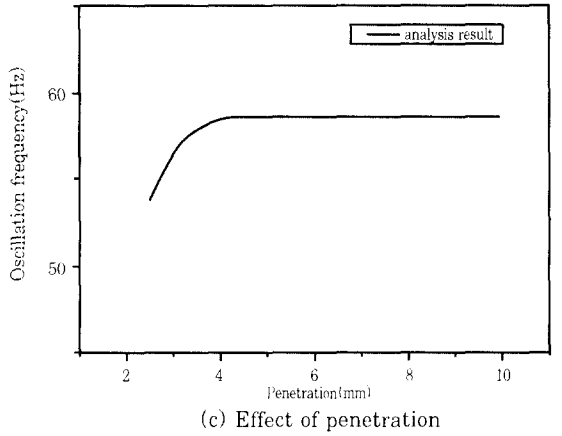
부분용입 풀의 계산 결과로부터 진동 주파수는 입력변수인 아크 압력과 전자기력에 무관하지만, 표면장력과 용융풀의 반경에 크게 영향을 받으며 Marangoni 유동은 주파수에 제한적인 영향을 미친다. 또한, 용입이 작은 경우에는 용입이 증가하면 주파수가 증가하지만, 용입이 일정 값 이상으로 증가하면 진동 주파수는 용입에 영향을 받지 않는다. 그러므로 부분용입 풀의 경우 진동 주파수를 이용하여 용융부의 폭을 측정하는 것은 타당하지만, 용입을 제어하는데 적용하는 것은 적합하지 않은 것으로 생각된다.

4. 결 론

아크 압력에 의한 용융풀의 표면 변형은 1mm 이내의 작은 값으로 계산되었으며, 표면 변형은 유속의 진동을 발생시키는 원인이 된다. 그러나 평균 유속에 미치는 영향은 그다지 크지 않기 때문에 정상 상태에서 표면 변형은 용융풀의 형상에 크게 영향을 미치지 않을 것으로 생각된다. 전자기력 등에 의하여 용융풀 표면의 외곽에서 중심으로 향하는 유동은 표면 변형을 감소시키는 역할을 한다. 표면장력 구배에 의한 Marangoni 유동은 표면 변형과 유속에 큰 영향을 미치며, 표면장력 구배가 양의 값을 갖는 경우에는 Marangoni 유동과 같은 방향의 회전 유동이 발생하므로 표면 변형은 작아지고 유속은 증가하였다. 열해



(a) Effect of pool radius



(c) Effect of penetration

Fig. 11 Effects of weld pool geometry on oscillation ($P=P_{200}$, I=200A, γ=1200dyne/cmK)

석을 포함하여 계산한 유동과 용융부의 형상은 기존의 연구 결과와 유사하였다. 부분용입 풀의 진동 주파수는 표면장력과 용융부의 직경에 의하여 크게 변화하고 Marangoni 유동에 의하여 약간 영향을 받지만, 전류나 압력에 의하여 영향을 받지 않는다. 용입이 일정값 이상으로 증가하면 진동 주파수는 용입에 영향을 받지 않는다.

참 고 문 헌

1. J.F. Lancaster : The physics of welding, 2nd Ed., Pergamon Press(1985)
2. G.M. Oreper, T.W. Eagar, J. Szekely : Convection in arc weld pools, Welding Journal, Vol.62, No.11(1983), pp.307s-312s
3. C.R. Heiple, J.R. Roper : Mechanism for minor element effect on GTA fusion zone geometry, Welding Journal, Vol.61, No.4(1982), pp.97s-102s
4. T. Zacharia, S.A. David, J.M. Vitek, T. Debroy : Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless steel, part I - theoretical analysis, Welding Journal, Vol.68, No.12(1989), pp.499s-509s
5. M.C. Tsai and S. Kou : Electromagnetic-force-induced convection in weld pools with a free surface, Welding Journal, Vol.69, No.6(1990), pp.241s-246s
6. M.L. Lin, T.W. Eagar : Influence of arc pressure on weld pool geometry, Welding Journal, Vol.64, No.6(1985), pp163s-169s
7. T. Zacharia, S.A. David, J.M. Vitek, T. Debroy : Weld pool development during GTA and laser beam welding of type 304 stainless steel, part II - experimental correlation, Welding Journal, Vol.68, No.12(1989), pp.410s-519s
8. M. Zacksenhouse, D.E. Hardt : Weld pool impedance identification for size measurement and control, Journal of Dynamic Systems, Measurement and Control, Vol.105, No.9(1983), pp.179-184
9. Y.H. Xiao, G.D. Ouden : A study of GTA weld pool oscillation, Welding Journal, Vol.69, No.8(1990), pp.289s-293s
10. 유중돈 : 완전용입 풀의 진동을 이용한 형상측정에 관한 연구, 대한용접학회지, Vol.11, No.8(1993), pp.74-85
11. 최상균, 유중돈, 김용석 : VOF 방법을 이용한 GMA 용접의 금속이행에 관한 동적해석(1)-입상용적과 스프레이 이행의 해석, 대한용접학회지, Vol.15, No.3 (1997), pp.168-177
12. H.K. Versteeg, W. Malalasekera : An introduction to computational fluid dynamics, Longman Scientific & Technical(1995)
13. I.G. Currie : Fundamental mechanics of fluids, 2nd Ed., McGraw-Hill(1993)
14. E.A. Brandes, G.B. Brook : Smithells metals reference book, 7th Ed., Butterworth - Heinemann Ltd.(1992)