

研究論文

GMAW에서 용적입사를 고려한 용융지 유동 및 형상해석

박 현 성* · 이 세 현** · 엄 기 원**

Analysis of Weld Pool Flow and Shape Considering the Impact of Droplets in GMAW

Hyunsung Park*, Sehun Rhee** and Ki-Woan Um**

Key Words : GMAW(가스메탈 아크용접), Weld Pool Flow(용융지 유동), Impact of Droplets(용적입사), Metal Transfer(금속이행), Kinetic Energy(운동에너지), Surface Tension(표면장력)

Abstract

In the present study, depressions of the GMA weld pool due to the impact of droplet are numerically investigated. The numerical simulation is conducted on the basis of the Navier-Stokes equation and the volume of fluid (VOF) functions. The kinetic energy of transferring droplet makes a depression of the weld pool surface. The surface active element affects the depression of the weld pool. The droplets transferred efficiently to the bottom of the weld pool, along with electromagnetic force make the finger shape penetration at the high current GMAW.

1. 서 론

용접자동화와 우수한 기계적 성질을 갖는 용접부를 얻기 위해 최근에 들어 많은 노력을 기울이고 있으며, 이를 위해서 용접부의 크기와 형상을 예측하는 것이 중요하다. 또한 용융지의 크기와 형상을 예측할 때는 용접부내의 열전달과 유체유동 현상

을 알아내는 것이 선행되어야만 한다.

용융지 유동현상에 관한 연구는 초기에는 반구형의 용융지를 가정하여 정상상태에서 전자기력을 고려하여 용융지의 유동을 해석하였다¹⁻³⁾. 그 후 주로 아크열을 이용하여 모재만을 용융시켜 접합하는 GTA용접(가스 텅스텐 아크용접)에 대한 해석^{4,5)}에 많은 연구가 있었으나 GTA용접은 주로 박판접합시로 사용이 제한된다. 그러나 더욱 광범위

※ 1997년 8월 14일 접수

*학생회원, 한양대학교 정밀기계공학과 대학원

**정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

하게 사용되어지고 있는 GMA용접(가스 메탈 아크용접)에 대해서는 Tsao와 Wu⁶⁾가 1988년에 연구, 발표했으나 2차원, 정지아크용접에서의 유동에 대한 것으로 실제의 모델과는 다른 것이었다. 또한 현재까지의 해석에서는 용융지의 유동현상을 일으키는 구동력은 전자기력, 표면장력, 부력, 아크력등 만을 적용하여 해석하였다. 또한 김재웅⁷⁾ 등은 3차원 이동열원에 대한 GMA용접의 유동에 대하여 수치해석을 수행하였다. 이 논문은 전자기력, 부력, 표면장력 등을 구동력으로 하여 용융지 유동현상과 용접부 형상해석을 수행하였으며, 용적의 입사의 모델링은 심선 송급속도(wire feed rate)를 사용하여 근사화된 모델을 만들어 해석하였다.

GMA 용접시 금속이행(metal transfer)의 특성이나 용적(droplet)의 크기, 용적의 입사속도 등은 용접전류에 의존한다. 용적의 크기는 용접전류가 증가함에 따라서 작아지며, 이 용적크기의 감소는 용적 이행율(droplet rate)의 증가를 가져온다. 특히 어느 특정 전류에서는 용적이행율의 급격한 증가를 나타내게 되는데, 이때의 이행은 입적이행(globular transfer)에서 스프레이 이행(spray transfer)으로 변화하게 된다.

1981년 Essers⁸⁾는 GMA용접시에는 금속이행이 발생하여 용입의 깊이는 용적의 운동량의 영향에 따라 변한다는 것을 실험적으로 연구, 발표하였다. 실제 GMA 용접시에는 위의 구동력뿐만이 아니라 용적이 이행될 때 용적이 가지고 있는 운동에너지에 의하여 용융지에 유동을 일으키게 되고 용융지 형상이 바뀔 것이다. Choo⁹⁾ 등은 고전류의 GTA용접에서 아크압력(arc pressure)에 의하여 용융지 함몰이 일어날 때, 아크가 사라진 직후부터 용융지의 유동과정을 SOLA-VOF를 사용하여 해석하였다.

따라서 본 논문에서는 전류에 따라 용적의 크기와 입사속도가 변할 때, GMA용접에서 용적의 영향을 고려함에 있어서, 가정에 의한 용적의 입사를 근사화하는 것이 아니라 직접 용적의 입사에 의한 용융지의 함몰과 자유표면의 유동현상을 수치해석하고, 이것이 실제 GMA용접의 용융지 유동에 어떤 영향을 미치는가를 고찰하고자 한다.

2. 용적입사를 고려한 용융지 유동해석 이론

이 수치해석을 수행함에 있어 다음과 같은 가정을 사용하였다.

- 1) 이 유체는 층류이며, 비압축성이다.
- 2) 이 시스템은 2차원 축대칭이다.
- 3) 밀도, 점성계수등 재료의 물성치들은 모두 상수이다.

2.1 지배방정식

해석에 사용된 연속방정식은 다음과 같으며,

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (1)$$

운동량 방정식(Navier-Stokes equation)은 다음의 식(2)와 같다.

$$\rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u \right) = -\nabla p + \nabla \tau \quad (2)$$

transient + convective = pressure + viscous

자유 표면(free surface)은 VOF(volume-of-fluid) method에 의하여 격자(mesh)에 나타내게 된다. 유체의 확산(advection)은 체적추적방법(volume tracking method)을 따르게 되며, 주어진 속도장에 기초로 하여 체적추적방법은 새로운 유체 표면을 결정하게 된다.

유체의 체적은 characteristic marker concentration F 에 의하여 나타내지게 되며, 이 F 의 전달 방정식은 다음과 같다.

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

VOF 함수 F 는 유체가 채워진 격자인 경우 1, 유체가 없는 격자인 경우 0, 그리고 자유표면인 경우 0에서 1사이의 값을 갖게 된다.

$$F = \begin{cases} 1 & \text{fluid cell} \\ >0, <1 & \text{surface-containing cell} \\ 0 & \text{void cell} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 용적이행에 의한 용융지 합물의 이론적 해석

용적(droplet)이 용융지로 전달될 때 용융지 표면에는 용적의 운동에너지(kinetic energy)가 전달되게 된다.¹⁰⁾ 이 운동에너지는 Fig. 1과 같이 용융지의 원통형의 구멍을 발생시키게 되는데, 이때 합물된 구멍을 형성시키는데 행하여진 일 W 는 다음과 같다.

$$W = \int_0^h (pdV + 2\pi a \gamma dh) \quad (5)$$

여기서, a 는 구멍의 반경, h 는 구멍의 깊이이며, 식(5)의 첫째항은 정수압(hydrostatic pressure)에 대한 일이고, 둘째항은 새로운 표면을 형성하는데 드는 일이다.

원통형 구멍의 체적 V 와 정수압 p 는 다음과 같다.

$$V = \pi a^2 h, \quad p = \rho gh \quad (6)$$

따라서, 식(5)는 다음과 같이 된다.

$$W = \pi a \left(\frac{1}{2} a \rho gh^2 + 2\gamma h \right) \quad (7)$$

또한, 구멍을 만드는데 한 일 W 는 다음의 용적의 운동에너지와 같다.

$$W = \frac{1}{2} mv^2 \quad (8)$$

만일 원통형 구멍반경이 용적의 반경의 2배라고 가정하면¹⁰⁾, 질량 $m = \frac{1}{6} \pi a^3 \rho$ 이다. 따라서 식(7)과

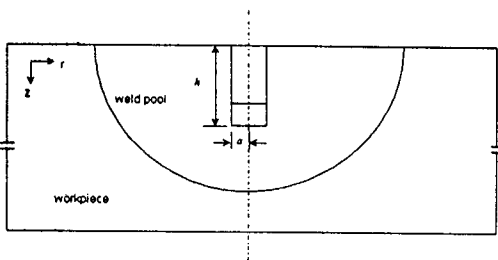


Fig. 1 Schematic diagram of a cylindrical cavity

식(8)로부터 합물되는 구멍의 위치인

$$h = \frac{1}{2} \left[-4 \frac{\gamma}{a \rho g} + \sqrt{\left(\frac{4\gamma}{a \rho g} \right)^2 + \frac{4a v^2}{6g}} \right] \quad (9)$$

을 얻을 수 있다.

3. 수치해석

3.1 해석모델링

본 연구에서는 위와 같은 모델을 이용하여 2차원 유동 해석을 수행하였으며, 해석은 유한요소 CFD(Computational Fluid Dynamics) code인 FIDAP7.6b를 사용하였다. 용접부는 용접부 단면의 1/2 mesh를 만들어 해석하였으며, 용융지의 반경과 깊이를 모두 6mm로 가정하였다. 해석의 정확성을 위하여 용융지가 형성되는 부분의 mesh는 조밀한 균일격자를 형성하였고, 해석의 경제성을 위하여 측면으로 갈수록 점점 커지는 형태로 형성하였다. 단, 변화율은 15%를 넘지 않게 하였다. 용적이 형성되는 부분과 공기로 해석하는 부분은 격자 형성의 어려움으로 인해 자유격자(paved mesh)를 사용하였다. 해석에 사용된 물성치들은 Table 1과 같다.

Table 1. Material properties of carbon steel

definition	symbol	value
surface tension	γ	1.2~1.8 N/m
density	ρ	7870 kg/m ³
viscosity	μ	0.006 kg/m · s

3.2 경계조건

본 해석에 사용된 경계조건과 초기조건은 Fig. 2와 같다. 축대칭을 사용하였고, 해석영역의 상부, 하부, 우측 경계면은 no-slip 조건을 주었고, z축에 대하여 free-slip 조건을 주었다. 초기 조건으로는 용융지의 초기 속도를 0으로 주었으며, 용적은 전류에 따라 초기속도를 z방향으로만 주었다.

해석조건은 전류의 변화에 따라 용적의 크기와 용적의 속도가 달라지고, 천이전류 구간이 존재하

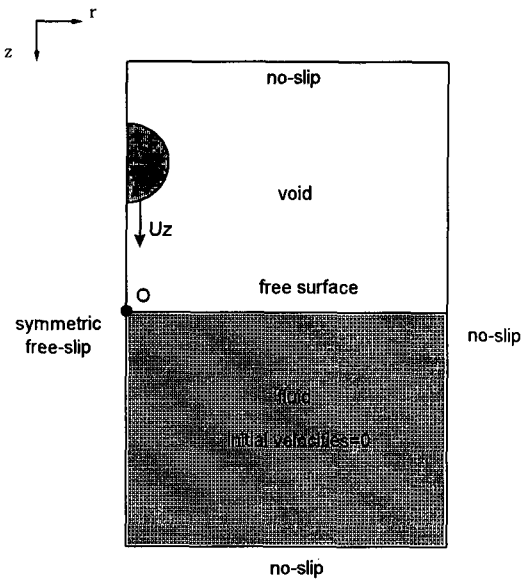


Fig. 2 Boundary conditions and initial conditions

는 범위를 해석해야 하므로, 보호가스는 100% Ar, 심선은 직경 1.6mm라 가정하여, 전류 250A일 때 용적의 반경은 약 0.7mm, 용적의 속도는 1.546%로 주었으며, 전류 275A일 때 0.6mm, 1.83%, 전류 300A일 때 0.5mm, 2.139%의 조건^{8),11)}을 주었다. 또한 용융지의 표면장력은 강에 표면활성화 요소 (surface active element)의 유무에 따라 달라지므로 1.2 N/m에서 1.8 N/m까지 적용하였다.

4. 해석결과 및 고찰

전류 250A, 표면장력 1.8N/m인 경우의 용적입사에 의한 용융지 유동현상을 Fig. 3에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 용적이 입사함에 따라 용적의 질량과 속도에 의한 운동에너지에 의해 용융지가 함몰되기 시작하며, 시간이 경과함에 따라서 최대위치까지 함몰된 후 표면장력과 정수압에 의하여 다시 회복되어 초기 표면위치까지 상승하게 된다. 용적이 입사한 후, 용융지 내부에는 깊

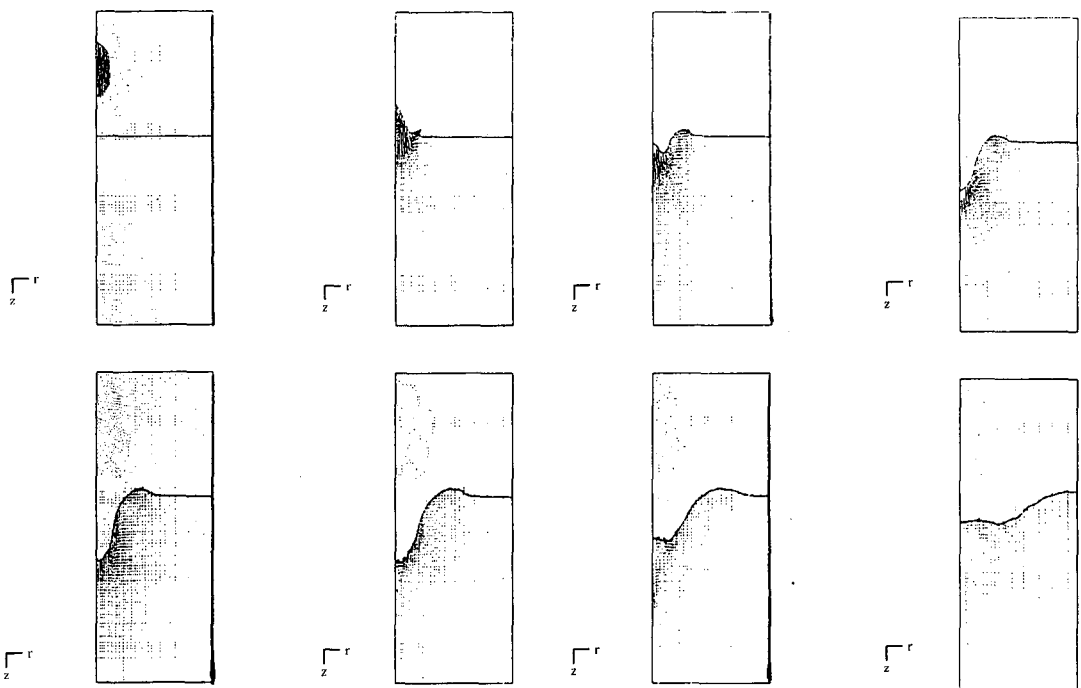


Fig. 3 The fluid flow due to the impact of droplet(I=250A, $\gamma=1.8\text{N/m}$)

이방향으로 들어가는 유동도 동반하였다. 최대로 함몰되는 것은 약 0.00395sec때에 초기 표면으로부터 약 2.2mm되는 지점임을 알 수 있었다. (Fig. 3은 연속적인 유동장의 형태를 보여주기 위하여 r방향으로 약간 수축되어 있다) Fig. 4는 시간에 따른 용융지 초기 자유표면의 속도값으로 초기표면의 중심인 O점으로부터 r방향으로 0.1mm 떨어진 지점의 시간에 따른 속도를 나타낸 것이다. 해석을 시작한 후 약 0.001sec에 처음 용적이 입사하기 시작한다. 이때 z방향으로의 속도가 크게 발생한 후, 함몰에 의해 이 점은 유체가 없는 void cell이 되어 속도는 0으로 변하며, 약 0.013sec에 다시 자유표면의 회복에 의하여 fluid cell이 되어 -z방향의 속도가 발생하는 것을 볼 수 있다. 따라서 용적이 입사하기 시작한 때로부터 용융지 표면이 다시 초기 위치까지 상승하여 다시 처음으로 fluid cell로 변하는 시간은 약 0.012sec가 소요된다. 그후 -, +z방향의 속도가 교대로 나타나는 약간의 표면 진동 (oscillation)을 동반하게 된다. Fig. 5는 최대 함몰된 위치 바로 아래 지점인 O점으로부터 r방향으로 0.1mm, z방향으로 2.4mm 떨어진 지점의 시간에 따른 속도이다. 용융지 내부에서도 표면의 변화에 따라 속도장의 변화가 나타남을 볼 수 있다.

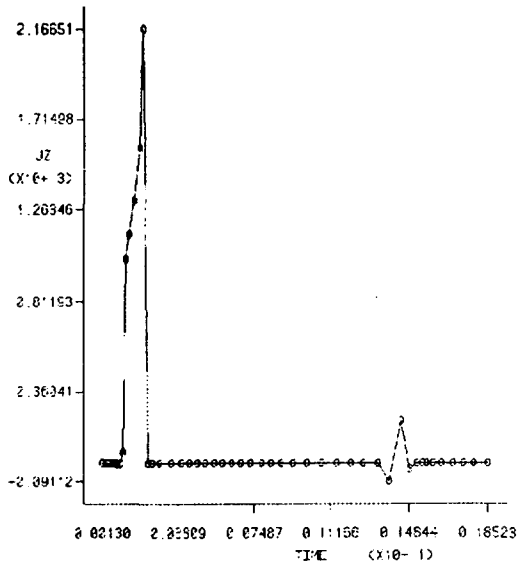


Fig. 4 The velocity history of fluid at node no. 205, which is located on the initial surface

Fig. 6(a)는 전류 275A, 표면장력 1.8N/m인 경우에 수치해석한 유동장을 나타낸 것이다. 용적의 반경이 0.6mm, 초기속도는 1.83m/s로 가정하였다. 여기서의 최대 함몰은 약 2.0mm정도가 되며, 용적의 입사후 초기 위치까지의 상승시간은 0.013sec가 소요되었다.

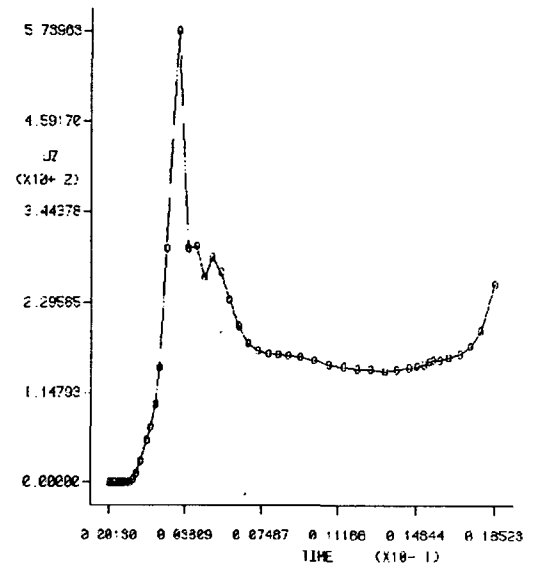


Fig. 5 The velocity history of fluid at node no. 2160, which is located on the bottom of depression

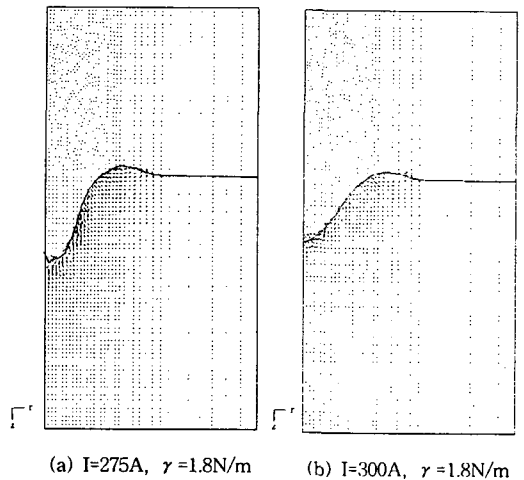


Fig. 6 The calculated maximum depression due to the impact of droplet

Fig. 6(b)는 전류 300A, 표면장력 1.8N/m인 경우에 수치해석한 시간에 따른 유동장을 나타낸 것이다. 용적의 반경이 0.5mm, 초기속도는 2.139m/s로 가정하였다. 해석결과의 함몰되는 깊이는 전류 250A나 275A의 경우보다 작게 나타난다. 여기서의 최대 함몰은 약 1.5mm정도가 되며, 용적의 입사후 초기 위치까지의 상승시간은 0.014sec가 소요되었다.

Table 2와 Fig. 7에 전류에 따라 표면장력을 변화시킬 때의 해석적인 해로부터 구한 결과와 수치해석 결과를 나타내었다. 용적입사에 의한 표면함몰의 경우도 Fig. 7과 같이 표면장력의 증가에 따라 용융지의 최대함몰이 줄어들음을 알 수 있다.

또한 Fig. 7에서 나타내진 바와 같이 해석적인 해로부터 구한 결과가 수치해석으로 구한 결과에 비해 상대적으로 낮게 나타나는 것을 볼 수 있다(여기서 N.A.는 수치해석을 나타낸다). 이는 Lancaster에 의하여 원통형 구멍의 반경이 용적의 2배라 가정⁶⁾한 결과로서, 수치해석 결과를 보면 함몰이 생성된 윗부분을 제외하고는 크기가 용적의 2배보다는 작다는 것을 알 수 있다. 따라서 원통형 구멍의 반경을 용적의 1.5배, 1배로 바꾸어 함몰깊이를 구해보면 Table 2, Fig. 8과 같이 수치해석한 결과에 점점 가까워지는 것을 볼 수 있다. 그러므로 원통형 구멍의 반경이 작아지는 것에 반비례하

여 함몰되는 구멍의 최대깊이는 커지므로 $a=r$ 로 가정하는 것이 가장 정확함을 알 수 있다.

Table 2와 Fig. 9의 전류에 따른 용융지 함몰을 보면 전류가 증가함에 따라 초기속도는 증가하지만, 용적의 크기가 줄어들어 운동에너지 값이 작아지고, 따라서 용융지의 함몰되는 깊이가 줄어들 수 있다. 그러나 전류의 증가에 따른 용적의 이행수를 보게 되면 전류가 250A인 경우는 초당 23개 정도의 용적이 입사하게 되고, 300A인 경우에는 약 230개의 용적이 입사하게 된다¹¹⁾. 이를 시간으로 바꾸면 전류가 250A인 경우는 0.04226sec

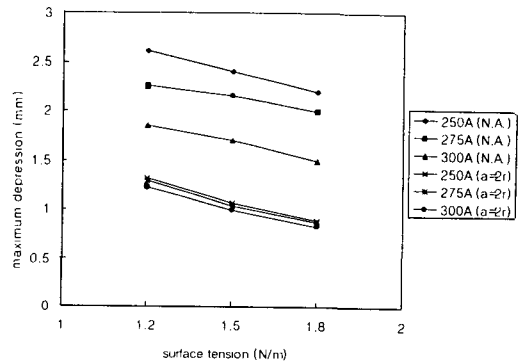


Fig. 7 The comparison of maximum depression with surface tension

Table 2. The results of simulation of surface depression

No.	current (A)	surface tension $\gamma(N/m)$	kinetic energy (J)	theoretical analysis			numerical analysis	
				h ($a=2r, mm$)	h ($a=1.5r, mm$)	h ($a=r, mm$)	time (sec)	h (mm)
1	300	1.2	9.427×10^{-6}	1.2261	1.6348	2.4522	0.00375	1.85
2	300	1.5	9.427×10^{-6}	0.9877	1.3169	1.9753	0.00319	1.7
3	300	1.8	9.427×10^{-6}	0.8262	1.1016	1.6524	0.00248	1.5
4	275	1.2	1.1924×10^{-5}	1.2871	1.7162	2.5742	0.00340	2.25
5	275	1.5	1.1924×10^{-5}	1.0386	1.3848	2.0772	0.00427	2.15
6	275	1.8	1.1924×10^{-5}	0.8697	1.1595	1.7393	0.00488	2.0
7	250	1.2	1.3513×10^{-5}	1.3145	1.7527	2.629	0.00598	2.6
8	250	1.5	1.3513×10^{-5}	1.0627	1.4169	2.1254	0.00500	2.4
9	250	1.8	1.3513×10^{-5}	0.8908	1.1877	1.7815	0.00395	2.2

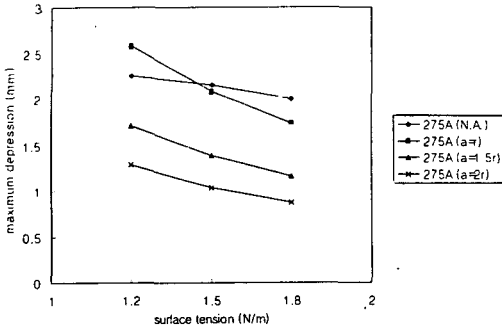


Fig. 8 The comparison of maximum depression with radius of cavity

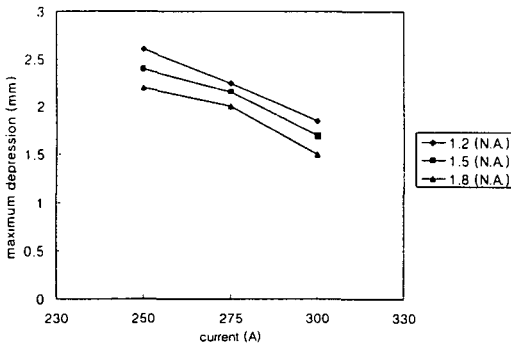


Fig. 9 The comparison of maximum depression with current

마다 한 개의 용적이 떨어지고, 300A인 경우에는 0.00433sec마다 한 개의 용적이 떨어지게 된다. 앞에서 용융지 표면이 용적의 입사후 초기위치까지 상승하는데 걸리는 시간은 입적이행 (globular transfer)의 경우인 전류 250A일 때 0.012sec이고 용적이 떨어지는 주기는 0.04226sec이므로, 용적이 한 개 떨어져 최대로 함몰된 후 다시 초기위치로 복원된다음에 두번째 용적이 입사하게 되어, 연속적인 용적의 입사가 용입형상에 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다. 금속이행이 스프레이 이행 (spray transfer)으로 바뀐 전류 300A인 경우에는 초기위치로의 상승시간이 0.014sec이고 용적이 떨어지는 주기는 0.00433sec이므로, 용적이 한 개 떨어져 함몰이 일어나고, 다시 원위치로 회복되기 이전에 다음 용적이 함몰되므로 용융지의 함몰이 더욱 깊어지게 될 것이라고 추정된다. 이는 스프레이 이행인 경우, 전자기력, 부력, 표면장력 등의 구동

력만에 의해서 용융지 유동에 의해 용융지의 형상이 결정되는 것이 아니라 용적의 입사가 용융지 유동과 형상변화에 큰 영향을 미칠 수 있다는 것을 예측하게 해준다. 그러나 본 수치해석은 하나의 용적이 떨어질 경우만을 해석하였으므로 추후 연속적인 용적의 입사를 고려하여 준정상상태에서 용융지의 함몰을 계산하여, 다른 구동력을 통한 해석에 적용한다면, 가정에 의존할 수밖에 없던 것들을 실제상황과 같게 해석조건을 맞추어줄 수 있으므로 좀 더 정확한 유동현상과 용접부 형상예측이 가능할 것이다. 또한, 이와 같은 해석이 이루어 진다면 GTA용접시 나타나는 finger shape penetration과는 달리, 용융지 중심부위에서 극단적으로 깊게 용입이 나타나는 고전류 GMA용접의 finger shape penetration의 발생 메커니즘을 설명할 수 있을 것이다.

5. 결 론

가스메탈 아크용접의 용적입사에 의한 용융지 유동해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 용적이 입사할 때, 용적이 가지고 있는 운동 에너지에 의해 용융지의 함몰이 변화함을 알 수 있었다.
- 2) 표면장력은 용융지 유동만이 아니라 용적의 입사에 의한 용융지 함몰에도 영향을 미침을 알 수 있었다.
- 3) 해석적으로 구한 결과, 원통형 구멍의 반경이 작아지는 것에 반비례하여 함몰되는 구멍의 최대 깊이는 커져 수치해석의 결과에 접근함을 알 수 있었다.
- 4) 스프레이 이행으로 변한 고전류인 경우에는 용적이 한 개 떨어져 함몰이 일어나고, 다시 원위치로 회복되기 이전에 다음 용적이 함몰되므로 용융지의 함몰이 더욱 깊어지게 될 것이라고 추정된다.

후 기

본 연구는 1995년도 한국과학재단의 핵심전문연구과제 (951-1005-065-2)에 의하여 수행되었습니다. 이에 한국과학재단 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Sozou, C., and Pickering, W. M. : Magnetohydrodynamic flow due to the discharge of an electric current in a hemispherical container, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 73, (1976), pp. 641~650
2. Andrews, J. G., and Craine, R. E. : fluid flow in a hemisphere induced by a distributed source of current, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 84, (1978), pp. 281~290
3. Atthey, D. R. : A mathematical model for fluid flow in a weld pool at high currents, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 98, (1980), pp. 787~801
4. Oreper, G. M., and Szekely, J. : Heat and Fluid Flow Phenomena in Weld Pools, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 147, (1984), pp. 53~79
5. Kou, S., and Wang, Y. H. : Computer Simulation of Convection in Moving Arc Weld Pools, *Metallurgical Transaction*, Vol. 17A, No. 12, (1986), pp. 2271~2277
6. Tsao, K. C., and Wu, C. S. : Fluid Flow and Heat Transfer in GMA Weld Pools, *Welding Journal*, Vol. 67, No. 3, (1988), pp. 70s~75s
7. Kim, J. W., and Na, S. J. : A Study on the Effect of Contact Tube-to-Workpiece Distance on Weld Pool Shape in Gas Metal Arc Welding, *Welding Journal*, Vol. 74, No. 5, (1995), pp. 141s~152s
8. Essers, W. G., and Walter, R. : Heat Transfer and Penetration Mechanisms with GMA and Plasma-GMA Welding, *Welding Journal*, Vol. 60, No. 2, (1981), pp. 37s~42s
9. Choo, R. T. C., Szekely, J., and Westhoff, R. C. : Modeling of High-current Arcs with Emphasis on Free Surface Phenomena in the Weld Pool, *Welding Journal*, Vol. 69, No. 9, (1990), pp. 346s~361s
10. Lancaster, J. F. : *The Physics of Welding*, Pergamon Press, New York, NY, (1984), pp. 204~267
11. Rhee, S., Kannatey-Asibu, E. : Observation of Metal Transfer in GMAW, *Welding Journal*, Vol 71, No. 10, (1992), pp. 381s~386s
12. FDI, FIDAP 7.5 Theory and update manual, (1995)