

FEM을 이용한 GMA 용접공정의 비드형상 모델링

Modelling of Bead Geometry for GMA Welding Process Using FEM

정영재(목포대학교 대학원), 이계정(한국산업인력관리공단)
Jeong Young-Jae(Graduate School, Mokpo National Univ.)
Lee Kye Jeong(Korea Manpower Agency)

Abstract

Over the last few year, there has been a growing interest in quantitative representation of heat transfer phenomena in weld pools in order to relate the processing conditions to the quality of the weldment produced and to use this information for the optimisation and robotization of the welding process. Normally, a theoretical model offers a powerful alternative to check out the physical concepts of the welding process and to calculate the effects of varying any of parameters. To solve this problem, a transient 2D(two-dimensional) heat conduction were developed for determining bead geometry and temperature distribution for the GMA welding process. The equation was solved using a general thermofluid-mechanics computer program, PHOENICS code, which is based on the SIMPLE algorithm. The simulation results showed that the calculated bead geometry from the developed models reasonably agree with the experiment results.

1. 서 론

자동화란 의미로써 처음 시도된 방법은 용접조건을 미리 정해진 상태에서 용접 작업을 대행하는 기계식 용접기(mechanized welder)가 있었다. 하지만 이렇게 미리 정해진 조건이 용접중 발생할 수 있는 공정중 외란에 대한 보상이 불가능하다. 공정중 발생할 수 있는 외란은 기구적 원인, 재료적 원인 및 용접기 전원과 관련된 원인들로 분류된다^{1~4)}. 기구적 원인은 피용접물의 가공성 변화와 부적절한 지그 때문이며, 재료적 원인은 재료의 불순물, 사용재료의 부적절한 용접조건이며, 용접기 전원과 관련된 원인은 용접기의 불규칙한 변동에 기인한다. 그러므로, 엄밀한 의미에서의 자동화란 것은 용접중 용접부 품질을 대변하는 공정변수들을 측정하여, 그에 영향을 주는 여러외란에 의한 영향을 실시간으로 보상해주는 기능을 갖추는 것이다.

산업의 발달과 더불어 숙련된 기술자 요구가 증가함에 따라 최근 용접기의 공정개선 및 최적 공정변수 선정과 관련된 연구가 활발히 진행되어 오고 있다. 또한 용접자동화를 구현하기 위해서 다양한 종류의 센서가 개발되고 있다. 일반적으로 용접 공정 자동화를 위하여 이용한 센서는 크게 시각센서와 아크센서로 나눌 수 있다. 시각센서는 CCD카

매라를 이용하여 위치정보를 얻고 이 위치데이터를 용접선 자동추적 및 용접품질 제어에 이용되며, 아크센서는 아크특성 자체를 이용하여 용접선을 자동추적(seam tracking) 것이다. 한편 센서 및 용접기의 성능이 아무리 우수할 지라도 선정된 용접조건이 적절하지 않을 경우 용접결함이나 예기치 않은 용접부 형상을 초래할 수 있다. 따라서 선정된 용접조건에 따른 용접부 형상 및 용접결함을 예측할 수 있는 접근방법이 필수적으로 요구된다. 용접부 형상을 예측하고자 하는 연구가 최근 많이 진행되어 오고 있으며 이는 크게 해석적 방법(analytical method)과 실험적 방법(experimental technique)으로 나눌 수 있다. 해석적 방법은 주로 용융부의 크기를 미리 가정하고, 이를 바탕으로 중력(gravitational force)과 표면장력(surface tension) 등의 힘을 고려하여 표면변형에 관한 수학적 모델링을 유도하는 방식이 주로 사용되었으며, 실험적 방법은 다양한 실험을 통하여 용접부 형상과 용접조건 사이의 관계를 수학적으로 모델링 함으로서 선정된 용접조건이, 비드형상을 결정하는데 미치는 영향도를 예측하는데 사용되었다.

아크에 의하여 용접부에 가해진 열은 접합부의 금속을 녹여서 용융지를 형성하고 일부는 전도에 의하여 모재로 손실되고, 나머지 일부는 대류 및 복사에 의해서 대기로 빠져나간다. 용접공정의 출력변수인 용접부 온도와 용융지크기(bead geometry)는 이와 같은 열적현상에 지배를 받기 때문에 열입력에 대한 이러한 출력변수의 동적 거동을 얻기 위해서는 용접부에서의 열적현상을 고려해야 한다. 해석해에 대한 보완은 좀더 실제적인 가정을 도입함으로써 이루어지며, 그 대표적인 것으로는 분포열원, 상변화 그리고 용융지 내부의 유체유동을 고려한 연구가 대부분을 차지한다. 그러나, 모든 이러한 해석은 단지 준정상 상태에서만 유용하다. 이러한 정적모델은 대상고정의 동적거동에 근거하여 이루어지는 용접공정의 최적화 및 공정제어기 설계에는 부적합하다. Kim⁵⁾와 Tsao⁶⁾ 및 Matsunawa⁷⁾

는 준무한(semi-infinite) 평판에서 Gaussian 분포의 열원을 갖는 온도장의 과도적 모델을 유도하였다. 이 모델은 온도분포의 과도적 특성을 설명하고 있지만 용접물의 두께를 준무한 평판이라는 비현실적인 가정하에 이루어졌기 때문에 용입깊이를 예측하는데 많은 오차를 유발하고 있다. Brent⁸⁾의 영상기법은 용접표면에서의 실질적인 경계조건을 고려하지 않았고 그 결과 얇은박판 또는 완전용입 용접조건하에서 큰 온도분포 오차를 보여주고 있다. 최근까지 주로 용융과 관련된 연구는 주로 GTA(Gas Tungsten Arc)용접에 국한되어 있거나, GMA(Gas Metal Arc)용접의 경우 아크압력이 비드형상을 결정하는데 미치는 영향이 중력에 비하여 무시할 만큼 작다고 가정하고, 용융지 모델링을 연구하였다. 용접부의 크기와 형상과의 관계를 실험적으로 결정하기 위해 실제적인 데이터로 사용할 수 있지만, 여기서 사용된 용접조건은 아크전압, 용접전류 그리고 용접속도 등과 같은 실제적인 값들이 아니므로 다양한 공정변수에 따른 용접부 형상을 예측하기란 매우 어렵다. 따라서 비드형상 및 용접결함을 공정변수로 부터 예측할 수 있는 수학적 모델개발이 필수적으로 요구된다.

GMA용접은 열원으로부터 전극과 용접물 사이에 강한 용접전류에 발생하는 전기적인 아크를 사용하여 용접물을 접합하는 방법으로, GMA용접에서의 열 유동의 해석은 용융지의 형성, 재료적인 특성변화 등의 연구를 위해서는 필수적이며, 일반적으로 크게 3단계의 열 유동을 거친다. 처음 용접이 시작되면서 열원 주위의 온도는 상온에서부터 용융온도까지 상승하고, 그 이후 열원이 계속 진행함에 따라 열원을 중심으로 하여 예열과 용융상태 그리고 냉각상태가 평형을 이루는 준정상상태(quasi-steady state)에 도달한다. 그러나, 열원이 제거되면 용접부는 냉각하기 시작하여 결국 상온에 이르게 된다. 본 연구에서는 2D 전도방정식을 유도하고, 정상상태에서 온도변화 및 용융지의 크기, 즉 비드크기에 관하여 연구하고자 한다.

2. GMA 용접공정의 수학적 모델

용융지내에서 열 유동을 해석하기 위한 수학적 모델을 개발하기 위하여 다음과 같은 가정 하에서 구한다.

- (a) 용접물의 재료는 균일성(homogeneity)과 등방성(isotropy)
- (b) 용융지 내부의 유체유동을 고려하지 않으며 등가 열전도계수로 보정
- (c) 아크의 열원은 double ellipsoidal 분포
- (d) 용접하는 동안 공기와의 접촉면에서는 대류와 복사에 의해 열 유출

열전도 지배방정식은 다음과 같다.

$$\rho \cdot C_p \cdot \frac{\partial T}{\partial t} - U_0 \frac{\partial T}{\partial X} = \nabla \cdot (K \cdot \nabla T) + \Delta H \quad (1)$$

식 (1)의 초기조건은 처음 모재의 온도에 따라 결정되며, 여기서는 처음의 모재의 온도가 상온이었다는 가정하에 다음과 같이 나타내었다.

$$T = T_0 \quad (2)$$

식(1)의 해를 구하기 위하여 경계면에서의 경계조건은 다음과 같다. X좌표로 이동하는 열원의 선단인 X에서는 모재의 초기온도로 가정한다.

$$T = T_0 \quad (3)$$

Z좌표에서는 아크의 용접열원과 접하는 경계면에서는 열원은 전극과, 모재사이에 강한 전류를 흘릴 때 발생하는 아크의 열로서 Double ellipsoidal 분포를 갖는다고 가정하였으며, 내부에서의 열원분

포는 다음과 같다.

$$Q = \frac{6\sqrt{3}Q}{abc\pi\sqrt{\pi}} \exp\left[\frac{-3y^2}{a^2} + \frac{-3z^2}{b^2} + \frac{-3x^2}{c^2}\right] \quad (4)$$

여기서, 용접물의 윗면은 고온상태에서 산화되는 것을 막기 위하여 보호가스로서 대기와의 접촉을 차단하므로, 일반적으로 대류에 의한 열 손실이 존재하며, 고온의 용융지에 복사에 의한 열 손실이 또한 존재하므로, 열 손실항은 다음과 같다.

$$Q = h_c A (T - T_\infty) + \sigma \epsilon (T^4 - T_\infty^4) \quad (5)$$

3. 유한 차분모델(finite difference model) 해결법

용융지내에 계산의 정확성을 높이고, 분석비용을 줄이기 위하여 부등매쉬(nonuniform mesh)를 이용하였다. 조밀한 입자는 열원근처에 배치하였으며 반대로 거친 입자는 용융지에서 먼 곳으로 배치시켰다. 수학적 모델은 Fig. 1에서 나타낸 것과 같이 온도분포를 계산하기 위하여 40×41 비균일 고정된 사각형 그리드 시스템을 이용하였다. 용융지 크기는 약 4mm로 예측하였다. 최소 반경 그리드는 0.15mm이며 최소 축 그리드는 0.14mm이다. 식 (1)의 해를 위하여 문제영역은 직사각형 콘트롤 체적에 포함된다. 콘트롤 체적내 변수들의 값은 관련 노드(node) 값에 관하여 나타낸다. 주 노드는 각 콘트롤 체적의 중앙에 위치시켰다. 미분방정식의 차분화는 자분화 과정이 물리적 현상에 기초를 둔 검사체적법을 이용하였다. 검사체적법에서는 미분방정식의 유도시에 기본이 되었던 보존법칙(conservation law)을 각각의 검사체적에 대하여 적용하는 과정에서 다음과 같은 차분식을 얻게된다.

$$a_p = \sum a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (6)$$

유동현상 지배방정식의 차분화 과정에서는 Hybrid 모델 및 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고, 위와 같은 차분식을 TDMA 방법을 통해 풀이하였다.

경계조건과 함께 방정식을 해결하기 위해 상업적인 열 유체 컴퓨터 프로그램인 PHEONICS⁹⁾를 이용하였다. 이 프로그램은 SIMPLE 알고리즘에 기초한 것이며 편미분 방정식들을 커플링하여 해결하도록 개발되었다. 일반적으로 온도에 종속일뿐만 아니라 합성에도 종속하기 때문에 재료의 상태량은 정확하게 얻기 위해서는 상당히 어렵다. 결국, 여기서 나타난 값은 양의 근사법을 이용하여 구하였다.

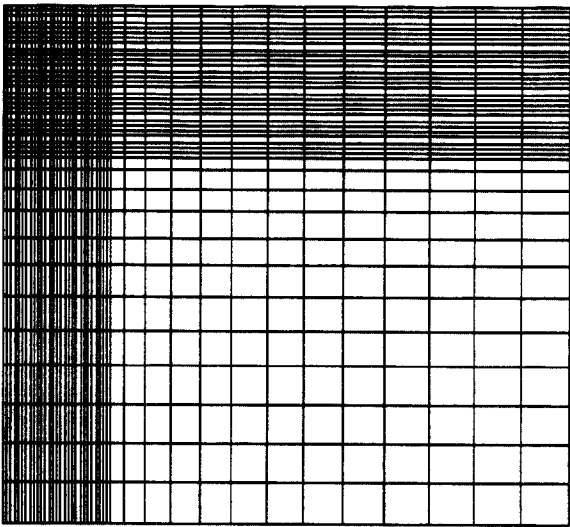


Fig. 1 Grid employed for computations.

수렴은 임계 그리드(critical grid) 위치에서 관련 종속변수의 스포트(spot) 값이 고정되고(<0.001), 지배방정식의 오차가 계속하여 줄어들 때 가능하다. 일반적으로 오차는 시뮬레이션 하기전 처음 스위프(sweep)가 종식되는 것에 관련하여 적어도 3차수까지 감소하여야 한다. 사용한 시간시스템은 10^{-3} 초이다. 스위프 수는 초기추정, 재료의 상태량, 세밀하게 조정된 완화변수와 같은 변수들에 의존하는 수렴한 해를 달성시킨 것이다. 계산은 언제 다음시

간 단계로 갈 것인지를 결정하는 simulation stop 기준인 기준오차는 온도를 계산하기 위하여 10^{-9} 로 가정하였다.

GMA 용접중 용융지의 크기 및 온도 분포도를 계산하기 위하여 어느시점까지 모재의 용융부 크기는 계속 증가하며, 이에 따라 비드형상을 예측하기 위한 경계조건이 변하게 된다. 용가재에 의해서 생성된 비드위에 열원이 계속 가해지면 모재의 용융부는 점점 크게 형성되고 비드와 모재의 용융부는 모두 액체상태이므로 응집력에 의해서 합쳐지게 된다. 실제로 이 부분에 나타나는 물리적 현상은 에너지가 최소화되는 방향으로 두 액체가 합쳐지거나 위와 같은 현상을 해석하는데 많은 난점이 있어서 본 연구에서는 용융된 비드가 용융상태의 모재쪽으로 응집력에 의해서 합쳐진다고 가정하였으며, 이를 비드형상을 예측하기 위한 경계조건으로 사용하였다. 이 때 공급된 용가재의 양은 일정하며 경계조건만 변하므로 용가재가 용접부에 공급된 시점에서 열원이 해석영역을 지나가기 전까지 용접부의 비드형상은 계속 변하게 된다

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

열 유동 해석을 통하여 based-on plate 용접부의 용융부를 계산하고 이를 경계조건으로 하여 식 (1)를 이용하면 용접부 형상을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 용입깊이(penetration)와 같이 모재가 녹은 부분의 기하학적 형상보다는 용가재에 의해서 형성된 용접부의 비드크기 예측에 주안점을 두었다. 따라서 모재의 용융부는 FDM(Finite Difference Method)해석에 의해서 결정하고 비드형상은 식(1)를 이용하여 예측하였다. 아크전류 및 용접전압은 360A와 25V이며, 전류분포 유효반지름은 3mm로 하였다. Fig. 2은 용접전류가 360A, 아크전압이 25V 그리고 용접속도가 6mm/sec인 경우 최고온도의 해석결과 및 비드형상 나타낸 것이다.

시간변화에 고액(liquid-solid) 구간사이에 단계적인

비드형상의 변화는 Figs. 3~5에 나타내었다. Figs. 3~5에 따르면 용접시간이 증가함에 따라 용입깊이 및 비드폭이 상승함을 알 수 있었다. 또한 0.75 초후 비드폭은 4.35mm이며 용입깊이는 3.60mm인 것을 Fig. 5로 부터 알 수 있다. 또한 길이당 열입력의 변화를 연구하기 위하여 1325K로 감소한 다음 0.75초동안 안에 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 결과는 Fig. 6에 나타내었다. 용입깊이는 3.73mm이며 비드폭 3.28mm임을 Fig. 6으로 알 수 있었으며, Fig. 2과 비교하여 보면 결론적으로 열입력이 감소하면 비드크기가 감소함을 알 수 있었다.

따라서, GMA용접공정에서 단위 길이당 열입력의 증가에 대해서 용융비드의 크기 지수들의 증가가 용접조건에 따라서 비선형적으로 증가한다. 용융비드의 폭의 경우, 비선형 증가의 주된 요인은 용접속도의 변화에 의해서 유발됨을 알 수 있다. 반면 용입깊이와 비드폭의 반을 합한지수의 경우에는 용접속도의 변화 외에 용접시편의 이면에서의 경계조건에 의한 비선형 성질이 관찰되었다.

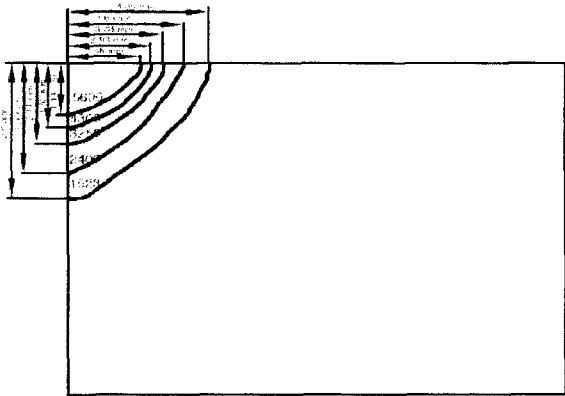


Fig. 2 Temperature field in weld pools for 2D conduction model

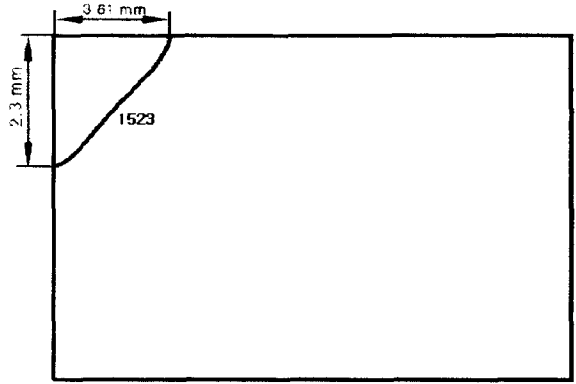


Fig. 3 Liquid-solid interface of the GMA welding process at 0.25 s

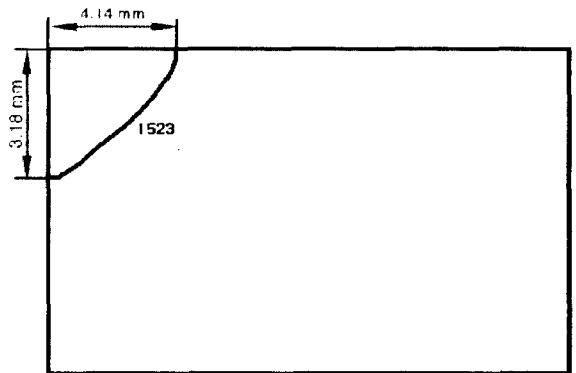


Fig. 4 Liquid-solid interface of the GMA welding process at 0.5 s

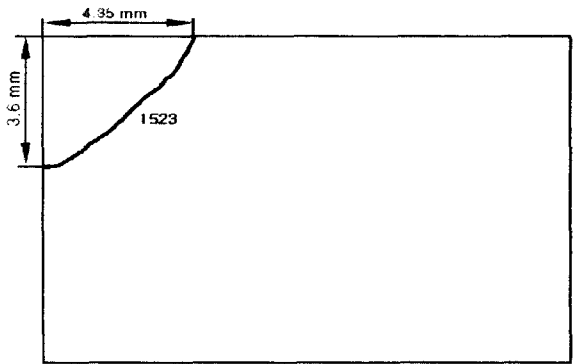


Fig. 5 Liquid-solid interface of the GMA welding process at 0.75 s

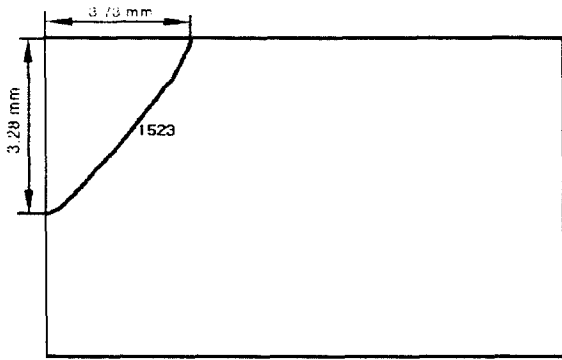


Fig. 6 Liquid-solid interface of the GMA welding process at 1325K heat source

5. 결 론

본 논문은 GMA 용접공정에서 공정변수 변화에 온도분포(비드크기)가 어떻게 변화하는가를 해석하였다. 이 연구목적을 달성하기 위하여, 2차원 열전도 모델을 개발하고 시뮬레이션을 수행하였다. 개발한 모델을 이용하여 용접시간이 변화함에 따라 비드크기, 특히 용입깊이가 상승함을 알 수 있었다. 이론적인 모델로부터 계산한 비드크기(비드폭과 용입깊이)를 실험결과와 비교하였다. 3차원 열전도 모델보다 정확한 비드크기를 예측하지만, 아직까지 상당한 오차가 존재한다. 이것은 용접 아아크와 용융지내의 물리적인 현상을 통합한 하나의 모델로 통합하는 것 때문이다. 현재 이에 대한 연구가 진행되고 있으며, 앞으로 좀더 정확한 이론적인 모델이 개발될 것으로 사료된다.

참고문헌

1. Woods, R. A. and Milner, D. R., (1971). "Motion in the weld pool in arc welding". *Welding Journal*, Vol. 50, No. 4, pp. 163-s - 173-s.
2. Heiple, C. R. and Roper, J. R., (1981). "Effect of selenium on GTAW fusion zone geometry".

- Welding Journal*, Vol. 60, No. 8, pp. 143-s ~ 145-s.
3. Andrews, J. G. and Crane, R. E., (1978). "Fluid flow in a hemisphere induced by a distributed source of current". *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 84, No. 2, pp. 281 - 290.
4. Atthey, D. R., (1980). "A mathematical model for fluid flows in a weld pool at high currents", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 98, No. 4, pp. 787 - 801.
5. Kim, S. D. and Na, S. J., (1992). "Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding". *Welding Journal*, Vol. 71, No. 5, pp. 179-s - 193-s.
6. Tsao, K. C., and Wu, C. S., (1988). "Fluid flow and heat transfer in GMA weld pools". *Weld journal*, Vol. 67, No. 3, pp. 70-s - 75-s.
7. Matsunawa, A., Yokoya, S. and Asako, Y.,(1988). "Convection in weld pool and its effects on penetration shape in stationary arc welds". *Journal of Japan Welding Society*, Vol. 6, No. 4, pp. 455 -462.
8. Brent, A. D., Voller, V. R. and Reid, K.J.,(1988). "Enthalpy porosity technique for modelling convection-diffusion phase change:Application to the melting of a pure metal". *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, pp. 297 - 318.
- 9 Spalding, D. B., (1993). "A guide to the PHOENICS input language - CHAM TR/100", CHAM, London, UK.