

# 유한요소법을 이용하여 로봇 GMA 용접의 비드형상 예측에 관한 연구

## A Study on Prediction of Bead Geometry in Robotic GMA Welding Using FEM

김일수\*, 박창언\*, 손준식\*, 김학형\*, 이연신\*\*, 차용훈\*\*\*

\* 목포대학교, \*\* 송원대학, \*\*\*조선대학교

### 1. 서론

산업의 발달과 더불어 숙련된 기술자 요구가 증가함에 따라 최근 용접기의 공정개선 및 최적 공정변수 선정과 관련된 연구가 활발히 진행되어지고 있으며, 용접자동화를 구현하기 위해서 다양한 종류의 센서가 개발되고 있다. 일반적으로 용접공정 자동화를 위하여 이용한 센서는 크게 시각센서와 아크센서로 나눌 수 있다. 시각센서는 CCD카메라를 이용하여 위치정보를 얻고 이 위치데이터를 용접선 자동추적 및 용접품질 제어에 이용하며, 아크센서는 아크특성 자체를 이용하여 용접선을 자동추적(seam tracking)하는 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. 일반적으로 GMA(Gas Metal Arc) 용접은 열적현상에 지배를 받기 때문에 열입력에 대한 이러한 출력변수의 동적 거동을 얻기 위해서는 용접부에서의 열적현상을 고려해야 한다. 최근까지 주로 용접부의 용융지와 관련된 연구는 분포열원, 상변화 그리고 용융지 내부의 유체유동을 고려한 연구가 대부분 GTA(Gas Tungsten Arc)용접에 국한되었다. 하지만 GMA 용접은 모델 개발의 복잡성 때문에 용융지에 대한 연구가 미진하다.

본 논문은 GMA 용접공정에서 용접품질인 비드형상과 관련하여 2D(two dimensional) 열전도와 2D 열유체 수학적 모델을 개발하여 비드형상에 대한 공정변수들의 영향을 연구하고 이를 이용하여 귀환제어 시스템(feedback control system)을 구축하는데 필요한 알고리즘을 개발하기 위한 체계적인 방법을 제안하는 것이다. 또한 이 해석해의 정확성을 검증하기 위하여 두께가 같은 두 연강판의 bead-on-plate 용접에 대하여 용접조건을 변화시키면서 실험을 하였으며 용접 시작점에서 일정한 간격으로 여러 단면에서 용접비드의 형상을 해석해의 계산결과와 비교하였다. 이 결과 비드폭 및 용입깊이에 대하여 상당히 좋은 결과를 보여주고 있다.

### 2. 해석모델 및 유한요소식

#### 2.1 2D 열전도 모델

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. 2D 열전도 모델은 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 도달하며, 열원이 제거되어 용접부는 냉각하기 시작하여 결국 상온에 이르게 된다는 가정하에 2D 열전도방정식을 개발하였다.

#### 2.2 2D 열유체모델

GMA 용접공정에서 spatially distributed 및 전류 플럭스는 용접부 표면 즉  $z=0$ 인 자유

표면 위에 낙하된다고 가정하여, GMA 용접공정에 발생하는 용입깊이는 용융지 표면 위에 낙하하는 용접아크 및 용융지로 낙하되는 droplets에 의한 열전달 때문이다. 결국, 자유 및 강제(free and forced) 대류 흐름이 용융지내에 반경 및 축방향으로 스며들며 용융지 내의 대류를 위해 4가지 추진력(전자기, 중력, 표면장력, 플라즈마 드랙)을 고려하여 모델을 개발하였다.

용융지 내에 계산의 정확성을 높이고, 분석비용을 줄이기 위하여 부등메쉬(nonuniform mesh)를 이용하였다. 조밀한 입자는 열원근처에 배치하였으며 반대로 거친 입자는 용융지에서 먼 곳으로 배치시켰다. 수학적 모델은 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.

열 유동 해석을 통하여 based-on plate 용접부의 용융부를 계산하고 이를 경계조건으로 하여 용접부 형상을 계산할 수 있다. 본 연구에서는 용입깊이(penetration)와 같이 모재가 녹은 부분의 기하학적 형상보다는 용가재에 의해서 형성된 용접부의 비드크기 예측에 주안점을 두었다. 위에서 개발한 지배방정식과 경계조건은 영국의 CHAM사에서 개발한 상업용 열 유체프로그램인 PHOENICS를 이용하였다. 아크전류 및 용접전압은 360A와 25V이며, 전류분포 유효반지름은 3mm로 하였다.

### 3. 실험방법

자동화 용접공정과 로봇을 이용한 용접은 모델링, 센싱 및 제어 등이 포함되며, 이 중에서 모델링은 가장 중요한 부분이다. 일반적인 모델링은 비용절감 및 응답요소의 주 및 상호작용 효과에 관한 정보를 제공할 수 있는 요인사험 방법(factorial design)이 최근에 개발되어 사용되고 있으며 본 연구에서는 위의 방법을 이용하여 실험준비를 하였다. 실험에 사용된 시험편은 200×70×12 mm 두께의 SS400 일반구조용 압연강재이며, 용접하고자 하는 시험편 표면은 녹, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결함의 원인이 되지 않도록 stainless wirebrush 및 cloth paper(#300)로 시험편을 깨끗이 닦아냈다. 실험방법은 먼저 로봇 용접기의 teaching box를 이용하여 용접을 실행하기 위해 프로그램 경로를 테스트하고, 일반구조용 압연강판 시험편을 용접지그에 위치한다. 다음으로 준비된 공정변수를 프로그램 유닛(program unit)를 이용하여 로봇에 입력시키고, 불활성가스를 공급할 준비를 함으로 로봇은 준비상태로 하여 용접을 수행한다. 새로운 공정변수를 프로그램 유닛을 이용하여 재프로그램화하고 용접을 계속한다. 비드크기를 측정하기 위해 용접시험편의 가로축을 중간 부분에 wire cutting machine을 사용하여 자르고 양쪽을 연삭한 다음 폴리싱(polishing)한 후 시험편 양쪽 비드형상을 나타내기 위하여 시험편 양쪽을 광택하고 HNO<sub>3</sub> 3% + H<sub>2</sub>O 97% Nital etch용액을 이용하여 에칭한다. 비드크기를 정확히 측정하기 위하여 시험편 양쪽의 에칭된 면을 배율 10배의 광학 현미경으로 사진을 현상하여 스캐닝 후 컴퓨터에서 좌표점을 주어 양쪽을 측정하여 평균값을 나타내었다.

### 4. 해석 결과 및 고찰

Fig. 1은 2D 열전도 모델의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 0.75초후 비드폭은 4.35mm이며 용입깊이는 3.60mm인 것을 Fig. 1로부터 알 수 있다. 따라서, GMA용접공정에서 단위 길이당 열입력의 증가에 대해서 용융비드의 크기 지수들의 증가가 용접조건에 따라서 비선형적으로 증가함을 알 수 있었다. 용융비드의 폭의 경우, 비선형 증가의 주된 요인은 용접속도의 변화에 의해서 유발되며, 용입깊이와 비드폭의 반을 합한 지수의 경우에는 용접속도의 변화 외에 용접시험편의 이면에서의 경계조건에 의한 비선형 성질이 관찰되었다.

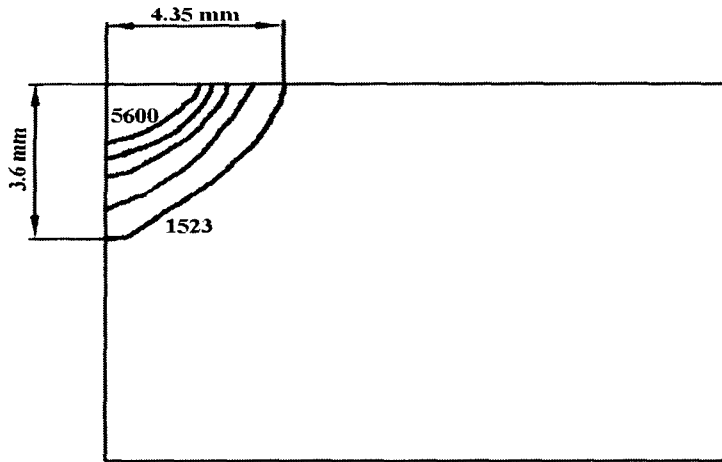


Fig. 1 Temperature field in weld pools for 2D conduction model

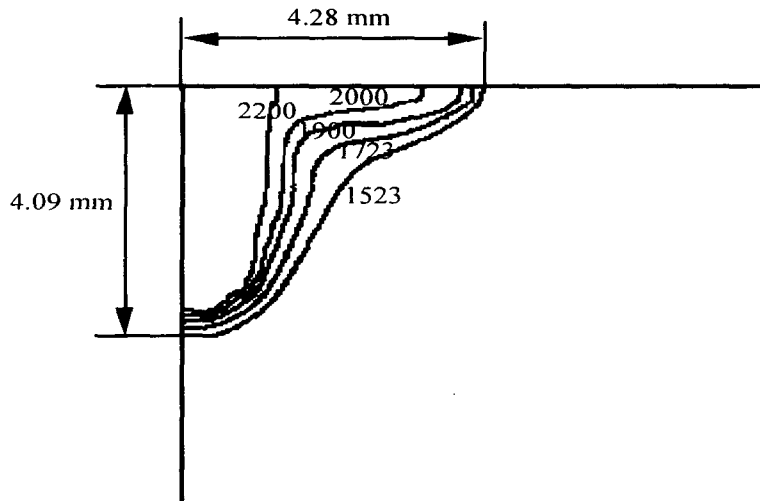


Fig. 2 Temperature field in weld pools for 2D conduction and fluid flow model

한편 GMA 공정 중 발생하는 2D 열유체 모델에 대한 시뮬레이션 결과인 용융지내의 계산된 온도분포도와 용융지의 형성은 Fig. 2로부터 Finger 형태의 용입깊이가 형성됨을 알 수 있었으며 용융지의 직경은 4.28mm이며 용융지의 용입깊이는 4.09mm 였다.

용융지 크기에 대한 공정변수의 영향과 컴퓨터 시뮬레이션의 결과를 평가하기 위하여 2D 열전도 및 2D 열유체 방정식으로부터 계산한 용융지 크기(비드폭 및 용입깊이)를 Table 1로 나타내었다. 2D 열유체 방정식으로부터 계산한 용입깊이는 2D 열전도 모델의 계산 값보다 정확하다는 것을 Table 1로 알 수 있으며, 이론적인 모델을 이용하여 계산한 비드폭의 값을 실험값과 상당히 일치함을 알 수 있었다.

Table1. Comparison of the calculated with the measured bead geometry

	Bead width(mm)	Penetration(mm)
Experimental results	9.98	4.37
2D conduction model	8.76	3.6
2D conduction and convection model	8.56	4.09

#### 4. 결 론

본 논문은 로봇 GMA용접 공정에서 공정변수 변화에 온도분포와 비드크기가 어떻게 변화하는가를 해석하기 위하여, 2D 열전도와 2D 열유체 모델을 개발하고 시뮬레이션을 수행하였다. 이론적인 모델로부터 계산한 비드크기(비드폭과 용입깊이)를 실험결과와 비교하였다. 2D 열유체모델이 2D 열전도 모델보다 정확한 비드크기를 예측하지만, 아직까지 상당한 오차가 존재한다. 이것은 용접 아아크와 용융지 내의 물리적인 현상을 통합하여 하나의 모델로 개발함으로써 가능하다. 현재 이에 대한 연구가 진행되고 있으며, 앞으로 좀더 정확한 이론적인 모델이 개발될 것으로 사료된다.

#### 참고문헌

- [1] Tichellar, G. W., Jelmorini, G. and van der Heuvel, G. J. P. M., "*Droplet temperature measurements in arc welding*", IIW Document 212-411-77, 1977
- [2] Kou, S. and Sun, D. K., "*Fluid flow and weld penetration in stationary arc welds*", *Metallurgical Transactions*, Vol. 16A, P. 203 - 213, 1985
- [3] Zacharia, T., Eraslan, A. H. and Aidun, D. K., "*Modeling of non-autogenous welding*", *Welding Journal*, Vol. 67, No. 1, P. 18-s - 27-s, 1988
- [4] Oreper, G. M. and Szekely, J., "*Heat - and fluid flow phenomena in weld pools*", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 147, No. 1, P. 53 - 79, 1984
- [5] Correa, S. M. and Sundell, R. E., "*A computational and experimental study of the fluid flow in weld pools*", *Modeling and Control of Casting and Welding Processes : Proceedings of the Third Conference on Modeling of Casting and Welding Processes*, Santa Barbara, CA, USA, 12-17, January, P. 211-227, 1986
- [6] Spalding, D. B., "*A guide to the PHOENICS input language - CHAM TR/100*", CHAM, London, UK, 1993
- [7] Matsunawa, A., Yokoya, S. and Asako, Y., "*Convection in weld pool and its effects on penetration shape in stationary arc welds*", *Journal of Japan Welding Society*, Vol. 6, No. 4, P. 455 - 462, 1988
- [8] Thompson, M. E. and Szekely, J., "*The transient behaviour of weld pools with a deformed free surface*", *International Journal Heat and Mass Transfer*, Vol. 32, No. 6, P. 1007 - 1019, 1989
- [9] Brent, A. D., Voller, V. R. and Reid, K. J., "*Enthalpy porosity technique for modelling convection-diffusion phase change: Application to the melting of a pure metal*", *Numerical Heat Transfer*, Vol. 13, P. 297 - 318, 1988
- [10] Patankar, S. V., "*Numerical heat transfer and fluid flow*", McGraw-Hill, New York, USA, 1980
- [11] Kim, I. S. and Basu, A., "*Mathematical models for open loop control in GMAW process*", *Proceedings of the 1st International Symposium on Advances in Intelligent Computer Integrated Manufacturing System*, 21 - 23, November, Seoul, Korea, P. 165 - 172, 1994.