FEM을 이용한 용접부의 열전달 및 잔류응력 해석

Analysis of Heat transfer and Residual Stress on the Weld Zone Using FEM

김일수*, 박창언*, 김학형**, 정영재**
목포대학교*, 목포대학교 대학원**

Abstract

This paper represents to develop a computer software system which is capable to analyze the phase transformation of high strength steel(BV-AH32) and to predict heat transfer, residual stress due to phase transformation during Gas Metal Arc(GMA) welding. The developed model was taken into account temperature dependent of young's modules, coefficient of thermal expansion and yield stress as well as the double ellipsoidal heat distribution by the moving arc. The results showed that the longitudinal and transverse residual stresses calculated by the coupled analysis of heat transfer, residual stress and phase transformation are in good agreement with the experimental data. In addition, the temperature distribution as well as longitudinal and transverse residual stresses of weldment were determined at the 1-pass and 2-pass of welding.

1. 서 론

일반적으로 용접으로 인한 각 용접부분에서의 온도상승 및 하강 과정은 각각 다르며, 용재 내부에서는 열팽창 및 수축에 의한 열변형이 발생하며, 부재 내부에서 열응력, 변형이 발생하여, 변형과정에서 소성영역이 생기면서 냉각 후에 응력 등이 잔류하게 된다. 용접 중 발생하는 잔류응력의 원인 및 방지대책에 관해서는 과거부터 연구가 진행되어 왔고, 지금도 연구가 활발히 행해지고 있다.[1~7] 하지만 실제 용접구조의 기하학적 형상은 복잡하고, 용접은 재료특성의 온도의존이나 소성변형 등을 포함한 비선형 문제이기 때문에 이론적으로 정확한 해를 얻는 것은 거의 불가능하다. 그러나 최근의 컴퓨터 성능의 발전과 함께 유한요소법은 열탄소성해석에 의한 용접 잔류응력과 잔류응력 형성에 도달할 때까지의 과도적 응력을 해석 할 수 있게 되었으며, 용접 잔류응력의 연구를 수행하는 데에는 없어서는 안될 도구가 되었다.

본 연구는 용접공정에서 상변태를 고려한 용접부의 열전달 및 잔류응력 해석과 관련하여 열전도 및 잠열탄소성이론에 의한 용접강도(열분포, 용접잔류응력 및 용접변형)를 평가할 수 있는 열-기계적 해석용 컴퓨터 시스템을 개발하고, 이 시스템을 이용하여 용접부의 가열 및 냉각 열이력(thermal history)에 따른 상변태의 수치적 모사 및 구조물의 취약부인 용접부에 발생하는 잔류응력과 변형 및 미세조직 변화의 정량적 해석을 수행하고자 한다. 또한, 개발된 컴퓨터 시스템을 이용하여 두께가 12㎜인 모재에 맞대기 용접(butt welding)을 모델로 하여 용접시 다층용접부위 온도 분포 및 온도 분포 변화에 따른 잔류응력 및 용접부의 취약부를 예측하고 실험결과값과 비교·분석하였다.

2. 본 론

2.1 실험방법

실험에 사용된 시험편은 BV-AH32강으로 시험편에 용접하고자 하는 표면의 부식, 스케일, 산화물 등 이물질이 용접결함의 원인이 되지 않도록 stainless wirebrush 및 cloth paper(#300)로 시험편을 깨끗이 닦아

냈으며, 용접 와이어는 직경 1.2㎜ solid 와이어를 사용하였다. 본 실험을 위해 선택한 공정변수들은 용접전류, 아크전압, 용접속도 등이며 응답요소는 잔류응력으로 Table 1에 실험에 이용된 용접조건을 나타내었다.

Table 1 Experimental condition of GMA welding process

Welding condition (Amp.×Volt)	Velocity	Weaving		Pass	Layer
		Width(㎜)	Number(n/min)		
270×28	26	8	90	2	2
170×23	15	12	45		

2.2 시스템 개발 및 수치해석

개발된 열-기계적 해석용 컴퓨터 시스템은 온도분포를 해석하고, 온도분포 계산결과를 이용하여 열응력 및 열변형을 시간변화에 따라 계산한 다음 마지막으로 잔류응력 및 변형을 구하도록 설계되어 있다. 개발된 시스템의 신뢰성을 평가하기 위해 선정된 모델의 크기와 형태는 Fig. 1과 같으며 길이 300㎜, 폭 200㎜, 두께 12㎜인 4각 평판을 이용하였다. 용접공정의 특성상 아크가 가해지는 용접부 근처에서는 매우 큰 열 변화가 일어나므로 세밀한 메쉬를 이용하였고 용접부에서 멀리 떨어질수록 온도의 변화가 심하지 않으므로 해석을 경제적으로 하기 위해서 점점 크기가 큰 메쉬를 사용하였다. 유한요소 모델의 요소의 총 개수는 788개이며 절점의 개수는 982개이다. 용융지 내에 계산의 정확성을 높이고 분석비용을 줄이기 위해 부등메쉬(non-uniform)를 이용하였다.

용접 아크에 의해 흡수된 열은 대부분 모재로 전도되며 대류열전달을 고려하여 아크에 의해 입열이 일어나는 용접부 이외의 모든 부분에서 자연대류를 가정하였고 자연열전달계수로 $h=10W/m^2K$을 사용하였다. 용접이 1패스에서 2패스로 진행된 이후 상온에서 자연대류에 의한 냉각이 일어난다.

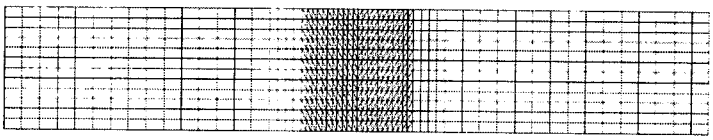


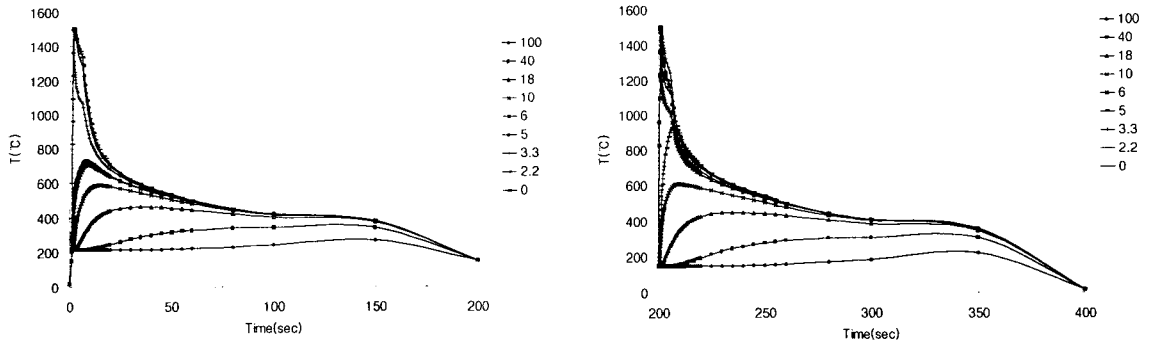
Fig. 1 Finite-element mesh for analysis

2.3 시뮬레이션 결과 및 고찰

Figs. 2～3는 Table 1에서 보는 바와 같이 입열량을 변화시켰을 때 용접부 중앙부에서 각 위치에 따른 온도 분포도를 나타낸다. 용접부 중앙부에서 현재 모델에서 t=0 일 때 용융지 표면에 용입량이 도입되어 1패스와 2패스의 온도 이력을 나타낸다. 나중에 실험에서 얻어진 데이터와의 비교를 위하여 용접방향에서 중앙인 부분, x=0㎜인 면을 축으로 하여 시편 표면 부위에서의 거리에 대한 온도 분포를 관찰하였으며, 두께에 대한 온도차는 미소하므로 무시하였다. 입열량이 변하면 최고온도에만 차이가 있을 뿐이고, 용접부 중앙에서 멀어질수록 냉각속도가 점차로 낮아짐을 알 수 있었다.

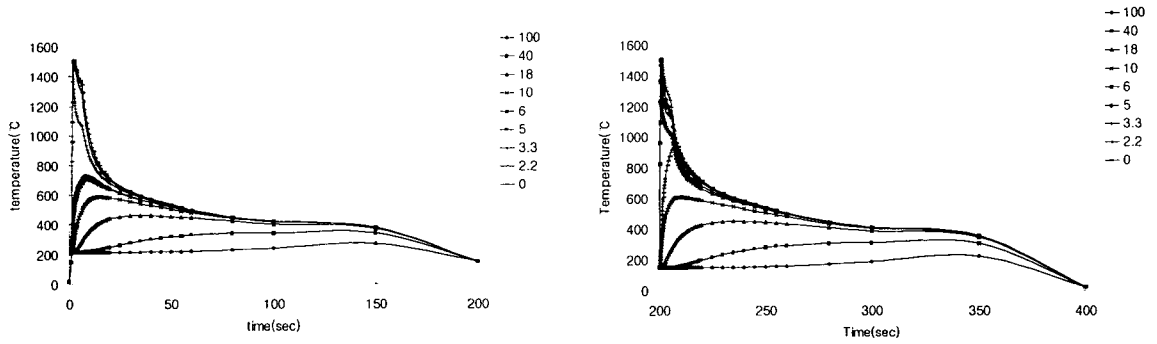
Figs. 4～5은 입열량을 변화시켰을 때의 simulation결과와 실제 실험결과를 비교한 것이며, 가로방향 및 세로방향의 잔류응력 분포도는 Figs. 4～5에 보는 바와 같이 (a)와 (b)로 각각 나타내었다. 최대인장응력은 융합부의 바닥부분에서 볼 수 있었으며, 융합부 외의 지역에서는 보다 낮은 잔류응력을 Figs. 4～5으로부터 알 수 있었다. 특히 이 지역의 경우는 용융지가 형성될 때 가장 높은 압축 항복응력이 작용하기

때문이며, 용접선 길이방향 잔류응력은 용접부 근처에서 매우 높은 응력상태를 보여주고 있다. 용접부에서는 항복응력에 가까운 인장응력이 집중되어 있고 용접선에서 멀리 떨어질수록 압축응력이 작용하였다가 점점 그 크기가 줄어드는 응력상태를 나타낸다. 실제 실험결과와 simulation 결과의 양상이 매우 일치함을 알 수 있었다.



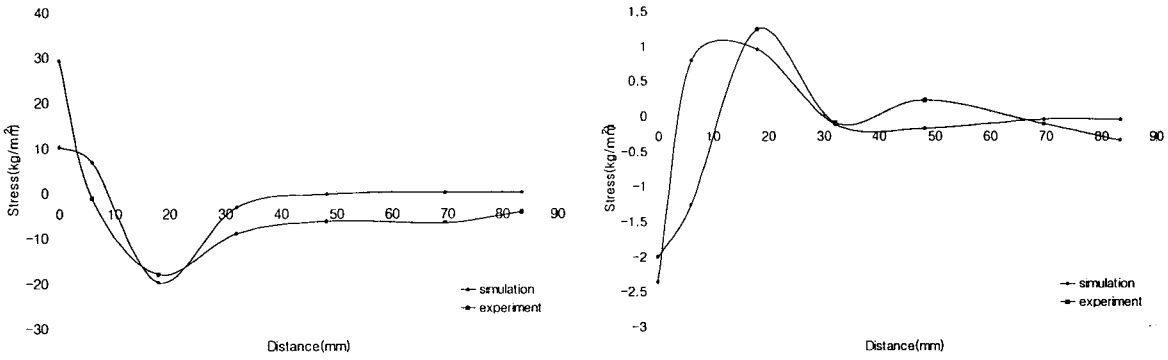
(a) one pass (b) two pass

Fig. 2 Temperature history on the top surface for heat source(5.67kJ)



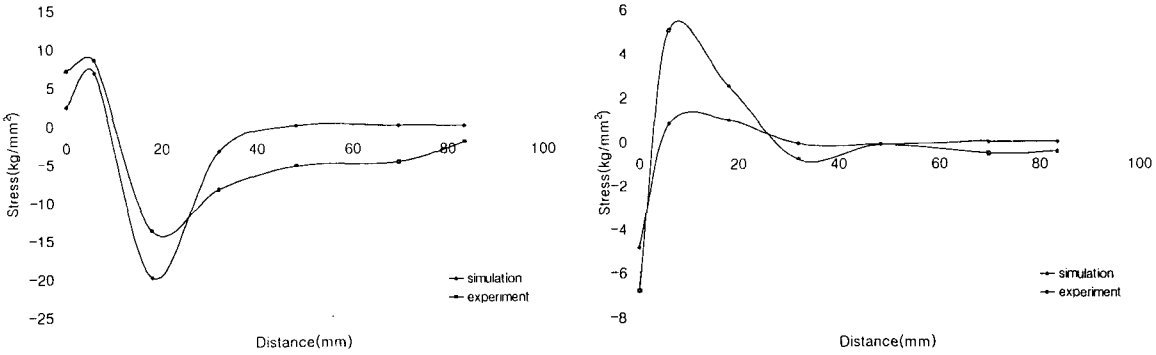
(a) one pass (b) two pass

Fig. 3 Temperature history on the top surface for heat source(2.93kJ)



(a) Longitudinal stress (b) transverse stress

Fig. 4 Comparison of experimental and simulated stress for heat source(5.67kJ)



(a) Longitudinal stress (b) transverse stress

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated stress for heat source (2.93kJ)

3. 결 론

개발된 시스템을 이용하여 두께 12㎜의 고장력강(BV-AH32) 모재에 맞대기 용접(butt welding)을 모델로 하여 열-기계적 해석을 수행하여 용접시의 온도분포, 용융부와 열 영향부의 크기, 온도분포 변화에 따른 잔류응력 분포 및 용접부의 취약부를 예측하고, 다층 용접부에 있어서 열응력 및 잔류응력 분포를 예측 및 분석하였다. 실험으로부터 측정한 측정값을 이용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로부터 계산한 가로 및 세로방향의 잔류응력 및 변질부(heat affected zone)의 크기 값과 비교·분석하였으며 비교적 잘 일치함을 알 수 있었다. 추가로 다양한 입열조건을 갖고 실험한 실험값과 시뮬레이션 결과값과 비교하였으며 정확하였다. 용접부와 열영향부의 경계면에서 큰 잔류응력이 발생하며, 변질부에서 최대의 유효소성변형률이 발생됨으로 이 영역이 용접부의 취약부가 된다.

후 기

본 논문은 기초전력공학 공동연구소를 통한 '99 전력기술 기초연구비 지원에 의하여 수행된 연구결과의 일부분이며, 관계자 여러분에게 감사드립니다.

참고문헌

1. D. Rosenthal, "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting", Welding Journal, Vol. 20, No. 5, pp.220-s~224-s, 1941.
2. T. Kasuya and N. Yurioka, Weld. J., Vol. 72, No. 3, pp. 107-s~115-s, 1992.
3. B. A. B. Andersson, J. Press. Vessel Tech., Vol. 97, pp. 206~213, 1975.
4. J. Goldak, A. Chakravarti and M Bibby, Metall. Trans., Vol. 114, pp. 587~600, 1986
5. D. F. Watt, L. Coon, M. Bibby, J. Goldak and C. Henwood, Acta metall, Vol. 36, pp. 3029~3035, 1988.
6. C. Henwood, M. Bibby, J. Goldak and D. F. Watt, Acta metall, Vol. 36, pp. 3037~3046, 1988.
7. J. M. Bergheau, J. B. Leblond, "Coupling between Heat flow, Metallurgy and Stress-Strain Computation in Steels; the Approach Developed in the Computer Code SYSWELD for Welding or Quenching", 5th Engineering Foundation Conference on Modeling of Casting, Welding and Advanced Solidification Process, 1990.