

파이프-평판 GMAB 접합부의 열유동 및 잔류응력 해석에 관한 연구

A study of heat flow and residual stress analysis in pipe-plate gas metal arc brazing

이태영* · 김재웅** · 이목영***

* 영남대학교 대학원 기계공학과

** 영남대학교 공과대학 기계공학부

*** 포항산업과학연구원 설비·용접 연구팀

1. 서 론

용접공정의 적용에 있어서 용접품질 및 생산성의 향상과 작업여건의 개선 등을 위해서는 용접 구조물의 설계기술 및 용접공정 자동화 기술의 적용이 필요하다. 용접공정 자동화의 최적조건을 구하기 위해서는 우선적으로 용접부의 정밀한 해석이 요구된다. 본 연구의 대상 공정인 “파이프-평판” 가스메탈 아크 브레이징 (Gas Metal Arc Brazing) 공정의 경우, 국부적인 가열/냉각에 의한 수축이 접합부의 미소변형에 미치는 영향이 크고, 토치 각도와 아크 중심 위치에 따른 형상오차가 발생하므로 이에 대한 대책도 요구되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 “파이프-평판” GMAB 공정의 열유동 및 잔류응력 해석을 수행하여 열영향부의 크기 및 잔류응력 분포를 예측하였다. 본 해석의 계산과정은 상용 해석 프로그램인 ‘ABAQUS’를 사용하였다. 또한 실험결과와 수치해석 결과를 비교하여 수치해석 모델의 유효성을 검증하였다.

k : 열전도 계수, [joule/m · sec, °C]

ρ : 밀도, $\rho = \rho(T)$, [g/m³]

c : 비열, $c=c(T)$, [joule/g · °C]

식(1)은 축대칭을 고려하여 3차원 열전도 방정식을 준정상상태 2차원 열전도 방정식으로 단순화시킨 것이다. Fig.1은 “파이프-평판”GMAB 공정의 해석영역을 나타낸다. 극심한 온도변화에 따른 아크열원의 입열부분에서는 격자생성을 조밀하게 구성하였다.¹⁾ 또한 수치해석 모델은 열원의 위치에 따라서 다르게 적용하였고, Fig. 2 는 경계조건으로, 용가재(Cu)가 접합부에 첨가시 용융온도이상으로 과열되어 공급되므로 비드(Bead)온도는 용융온도이상(1080°C)을 적용하였고, 비드가 완전히 형성된 후, 접합부에 입력된 전체 열하중은 비드형성에 의해 고려된 열하중과 분포열원에 의한 열하중으로 구성된다. 식(2)는 적용된 열하중을 나타내는 식이다.

$$Q_{input} = Q_{add} + Q \quad (2)$$

2. 해석 방법 및 실험

열유동 해석시 열원으로는 가우시안 분포 열원을 적용하였고, 해의 정확성을 위해 온도의 변화에 따른 재료 물성치의 변화도 고려하였다. 재료의 물성치는 용가재(filler metal)인 구리가 채워진 비드부분은 구리(Cu)의 물성치를 적용하였고, 모재는 강(AISI1020)의 물성치를 적용하였다. 경계조건으로 대류현상과 복사현상을 함께 고려하였고, 아크에 의한 열입력은 분포 열유속(heat flux)으로 주고 시간에 따라 이동하는 이동열원으로 고려하였다. 결국 내부 열발생이 없는 비선형 열전달 형태로 정식화하였다. 일반적인 열평형 조건으로부터 열전도의 기본 방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial r} \left(K \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \rho C_p \frac{\partial T(r, z, t)}{\partial t} \quad (1)$$

t : 시간, [sec]

Q_{input} : 용접 입열량 [J/s]

Q_{add} : Bead 추가시 함유된 열량 [J/s]

Q : 분포열원에 의한 입열량 [J/s]

또한 비드의 형상은 가로 : 세로의 비를 2:1로 하였는데, 이것은 용가재인 구리의 낮은 점성도를 고려한 것이다. 용접토치의 각도는 일반 수평필렛용접에서 적용하는 45° 와 해석모델의 비드면상에 수직인 63° 를 적용하였고, 브레이징 조건을 만족시키기위해 용접토치의 위치를 비드면 상에서 변경하여 해석을 시도했다. 용접부 열응력 해석은 시간에 따라 변하는 온도분포를 하중으로 입력하여, 온도변화에 따라 변화하는 열변형률을 초기 변형률로 취급하는 열탄소성 해석을 수행함으로써 접합부 열응력을 해석하였다. 실험을 통해 재료의 종단면을 잘라서 열 영향부의 크기를 해석치와 비교함으로써 열전도 해석을 평가하였고, 잔류응

력의 측정에 있어서는 응력측정방법 중의 하나인 절단법(sectioning method)을 이용하였다.

3. 요약과 결론

3-1 온도분포해석

유한요소해석시 2차원 열원모델의 신뢰성을 평가하기 위해 사용한 용접조건은 동일하고, 이 조건은 GMAB의 적용 가능 조건에서 적용하였으며, 해석 및 실험에 있어서 동일하게 적용하였다. 접합부 표면에서 아크열원의 중심으로부터 임의의 절점에서 Heating rate는 약 2000 °C/sec를 나타내었고, 이로부터 805°C 정도의 열영향부를 선택할 수 있었다. Fig. 3은 열영향부의 크기에 대하여 실험치와 해석치를 비교하여 나타낸 것으로 근접한 결과를 보이고 있다. 실험치와 해석치를 비교해 볼 때, 해석치의 아크효율에 따라 약간의 오차를 나타내었고, 오차의 주요인은 실제 용접시 나타나는 비드형상과 해석상의 가정된 비드형상이 어느 정도 차이를 나타내기 때문인 것으로 사료된다. 이상의 결과에서 접합조건을 만족하는 아크 중심 위치에 따른 열전도 현상은 속도 및 Power, 토치각도에 따라 동일한 양상을 보이고, 큰 차이를 나타내지 않았다. 또한 $\frac{\Delta HAZ\ size}{\Delta Power}$ 의 비는 속도가 증가할수록 작아졌고, 따라서 GMAB 공정에서의 열영향부의 크기는 속도인자에 의해 많은 영향을 받는다는 것을 알 수 있었다. 상기의 내용으로부터 잔류응력분포해석에서는 이러한 열유동해석을 통하여 일정한 위치(열원의 중심을 비드면의 중앙부에 적용한 경우)를 기준으로 한 해석치와 실험치를 비교, 평가하였고, 속도인자에 따른 잔류응력분포의 영향도 알아 보았다.²⁾

3-2 잔류응력해석

Fig. 4는 파이프의 외면에 있어 측정된 잔류응력 분포를 수치해석한 결과와 비교한 것을 나타내었다. 파이프쪽의 잔류응력은내부의 구속력으로인한 원주방향의 최대 인장잔류응력이 외부에서보다 내부에서 약 80Mpa정도 높았고, 축방향 잔류응력은 내면에서 인장 잔류응력, 외면에서 압축잔류응력을 나타내었다. 또한, 열원중심 주위에서 파이프의 내·외면, 평판의 윗·아랫면에서 잔류응력 차이를 알 수 있는데, 이러한 결과의 주된 이유는 윗면, 외면의 구리(Cu)와 아랫면, 내면의 강(Steel)에 대한 항복응력의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있다. 또한, 이종재료 접합부의 응력분포³⁾와 같이 기계적 특성의 차이 및 계면결합력에 따른 구리와 강의 경우를 고려할 때, 선팽창계수, 열전도가 큰 구리는 많이 수축한다. 이것은 접합면에서 강이 구

속하는 현상으로 나타나며, 냉각시 접합면으로부터 구리표면은 수축정도를 감소시키는 경향을 보이고, 강접합면의 압축에 의하여 강의 표면에는 인장잔류응력이 발생하는 것으로 여겨진다. 평판의 반경방향응력에서는 접합부위로부터 멀어질수록 인장잔류응력은 감소하지만, 압축잔류응력은 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있었다. 이것은 전체적으로 원주방향응력이 넓은 압축잔류응력을 나타냄으로서, 힘의 평형조건에 의해서 인장잔류응력이 넓게 분포하는 것으로 사료된다.⁴⁾ 상기의 측대칭, 2차원 잔류응력 해석결과, 실험치와 근접한 결과를 얻을 수 있었고, 실제 구조물의 접합 후 변형에 따른 형상오차에 의해 약간의 차이를 보였다. Fig. 5~6는 속도와 Power에 따른 잔류응력의 분포특성을 나타내었다. 적용된 조건으로 입열량의 차이를 좀 더 크게하여 속도에 따른 잔류응력의 분포차이를 확인하기 위해서 파워와 속도를 다르게 적용하였고, 이외의 모든 다른 조건은 동일하게 적용하였다. 결과로부터, “파이프-평판” 모두에서 속도가 빠를수록 입열량의 감소로 인해 인장잔류응력의 구간이 작아지는 것을 확인할 수 있었고, 잔류응력 분포에는 큰 영향을 미치지 않았다. 이상의 결과로서 파이프-평판의 아크브레이징에서의 적용가능한 접합조건을 제시하였다.

4.참고문헌

1. H. S. Moon, S. J. Na : A study on mathematical modeling and heat transfer analysis to predict weld bead geometry in horizontal fillet welding, Journal of KWS, Vol. 14, No. 6, DECEMBER, 1996, pp. 393-402
2. Y.DONG, J. K. HONG, C. L. TSAI, P. DONG : Finite Element Modeling of Residual Stresses in Austenitic Stainless Steel Pipe Girth Welds, Welding Research Supplement, OCTOBER 1997, pp. 442s-449s
3. 대한용접학회 용접편람편찬위원회 : 용접·접합편람, 大韓熔接學會, pp 499-509
4. Y.-S. Yang, S.-H. Lee, C.-W. Wee, S.-H. Cho : A study on the estimate of angular distortion for a fillet weldment, 大韓熔接學會誌, 第15卷, 第4號(1997), pp. 289-295

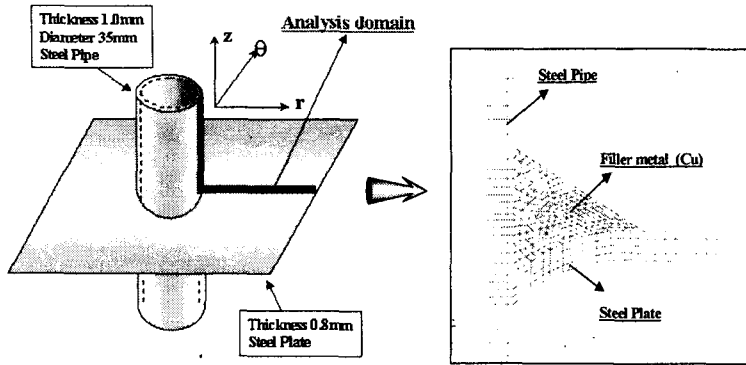


Fig. 1 Schematic of solution domain

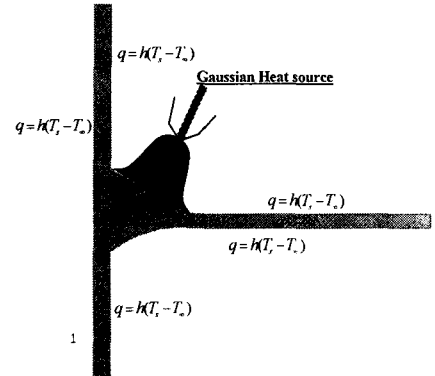


Fig. 2 Boundary conditions for thermal analysis

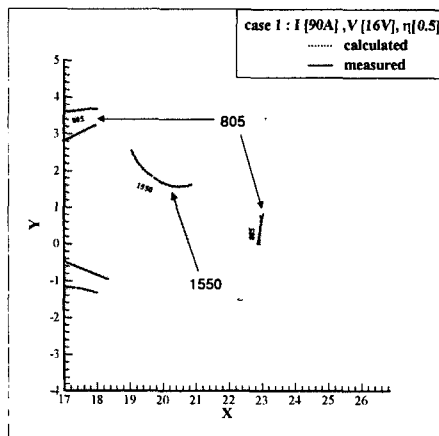


Fig. 3 Comparison of the calculated and measured HAZ size
(I : 90A , V : 6mm/s)

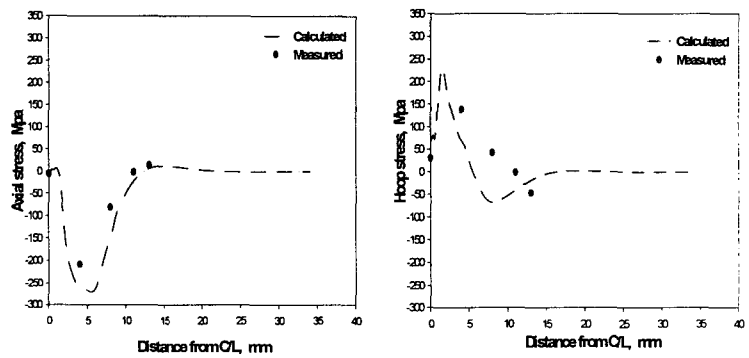


Fig. 4 Comparison of calculated residual stresses with measured one
on the outer surface of pipe (110[A], 16[V], $\eta = 50\%$, V=7(mm/s))

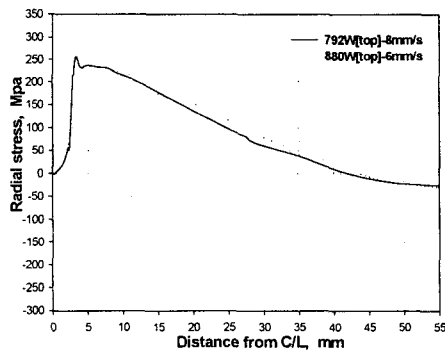


Fig. 5 Radial stress distributions according to traveling speed and power on the top surface of plate

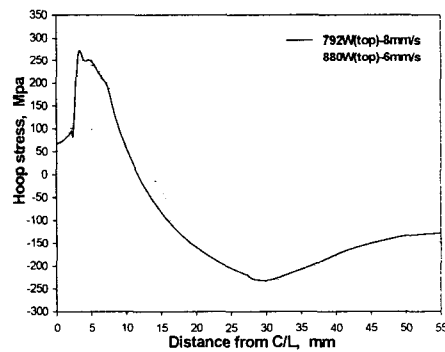


Fig. 6 Hoop stress distributions according to traveling speed and power on the top surface of plate