이동 열원을 고려한 전자빔 용접 유한요소해석

Finite element analysis of electron beam welding considering for moving heat source

충북대학교 기계공학부 조해용, 정석영, 장현욱
한국기계연구원 서정, 한유희

Ⅰ. 서론

전자빔 용접은 고유의 우수한 용접특성에도 불구하고, 장비 제작비용의 과다함과 제한적인 작업 환경으로 인하여 현재로서는 우주 항공 산업, 원자력 산업, 반도체 장비 산업 등의 특수한 분야에서만 선호되고 있다. 용접에 응용할 수 있는 해석적인 모델은 Rosenthal[1]에 의하여 점 열원과 선 열원에 관한 열유속 식이 처음 제시된 이후 Westby[2], Paley[3] 등에 의해 용접에 대한 온도 분포에 관한 수치 해석적인 모델을 제시하였고 Mazumder[4] 등은 키홀을 움직이는 가우시안 열원을 사용한 3차원 열전달 모델로 발전시켰다. 또한, Kim[5] 등은 아연도금 강판의 CO_2 레이저 용접에서 겹치기 용접의 FEM 시뮬레이션을 시도하였고, Kang[6]등은 교량용 후판 다층 용접 시 잔류응력과 변형에 미치는 루트간격의 영향을 해석하였다.

용접은 구조물의 국부적인 가열에 의해 높은 열이 발생되며 이로 인하여 불균일한 온도 분포와 열응력이 발생한다. 생성된 열응력은 항복응력을 초과하여 복잡한 소성변형을 하게 되므로, 냉각 수축한 후 잔류응력이 남게 된다. 본 연구에서는 상용유한요소 프로그램인 MARC를 이용하여 열원이 실제 구조물의 용접부를 따라 이동하는 방식으로 해석하였다.

Ⅱ. 유한요소해석

1. 모델링

용접 문제 해석의 특징은 용융부나 열영향부 등을 모델링하기 위하여 매우 작은 시간 증분을 필요로 하기 때문에 막대한 해석시간과 저장용량을 필요로 한다는 것이다. 따라서, 요소 분할(Mesh generation)은 국부적인 입열에 의해 온도구배가 심한 용접부 주변에서 보다 미세하게 분할하였으며 해석시간과 저장용량을 단축하기 위해 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 요소의 크기를 증가시켰고, 구조물의 모양은 원통형이며 x축으로 용접되어지는 부분을 기준으로 축대칭 모델로 가정하였으며 요소는 8개의 절점을 가진 육면체요소를 이용하여 3차원으로 구성하였다.

2. 해석에 필요한 경계조건 및 물성치

온도분포 해석 시 필요한 경계조건으로 먼저 초기에 주어지는 모든 절점에서의 온도를 대기의 온도와 동일하게 20℃로 하였고, 용접부는 가열 및 급냉의 복잡한 열 이력을 겪게 되므로

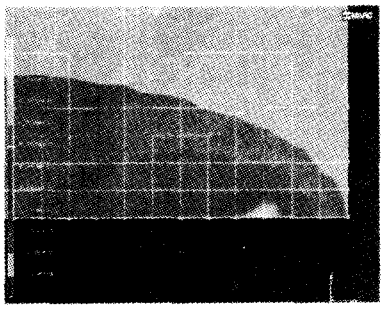
열팽창계수와 탄성계수 및 항복응력(등방성, von-Mises의 항복조건), 재료의 열적성질인 비열, 열전달계수 등을 온도에 따른 함수로 입력하였다. 열손실은 대류와 복사에 의해 지배되는데 이 중 복사현상은 방열계수(emissivity)로 지정하였으며 열대류계수는 온도에 따른 함수로서 입력하였고 열전달해석 시 고상과 액상의 상변화에 의한 잠열(latent heat)에 대한 효과도 고려하였다. 기계적 해석 시 필요한 경계조건은 축대칭에 의한 부분을 적용하여 구속시켰으며, 용접 시 구조물의 아랫부분은 지면과 수직으로 고정시켰고 용접이 시작되는 점을 용접방향으로 고정시켰다. 또한 모든 부분에서 회전(rotation)은 자유로운 것으로 보고 고려하지 않았다. 해석 시 열원이 이동해야 하기 때문에 열유속(heat flux)에 따른

식 $$q = \frac{3\eta Q}{\pi r_b^2} e^{\left(-\frac{3r^2}{r_b^2}\right)}$$

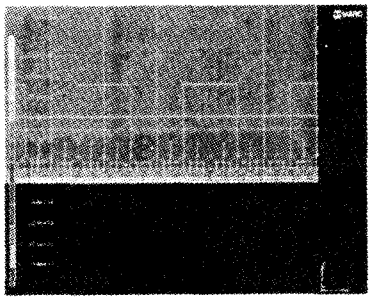
을 사용하여 subroutine을 작성하였다.

Ⅲ. 결과 및 고찰

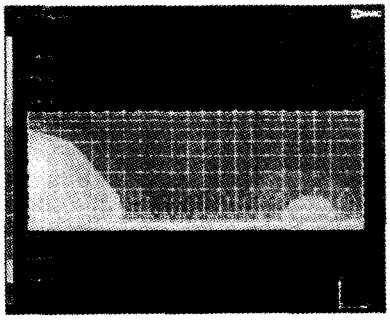
♣ 60kv×60mA, 430step



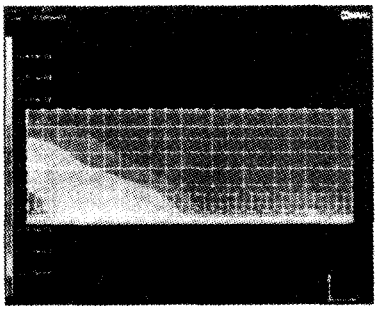
<그림 1> 온도 분포



<그림 2> 잔류 응력 분포



<그림 3> y축 변형 분포



<그림 4> z축 변형 분포

1. 온도 분포

용접시 열영향부의 범위와 온도분포는 같은 재료의 경우 빔출력과 빔속도에 영향을 받는다. 빔출력을 60kV*30mA로하고 용접속도를 분당 0.7~2m 까지 수행한 결과 용융범위(543.3~643.3℃)가 미소하거나 나타나지 않았다. 반면에 빔출력을 60kV*60mA로 하여 속도를 변화 시켰을 경우는 아래 <표 1>에서 볼 수 있는 것처럼 용융부의 반경은 속도가 느릴 경우 커지고 속도가 빨라질수록 반경만 줄어들었다. 이 경우 최고 온도의 크기는 차이가 크지 않았는데 이는 응고 잠열의 영향으로 생각된다. 즉 빔출력 60kV*60mA, 용접속도 1m/mim 인 경우 최고 온도가 700~980℃, 용융반경이 2.2~3mm 이고 이후 용접 속도가 빨라질수록 최고 온도의 범위와 용융 반경이 줄어들어 최고 온도 430~720℃, 용융반경 0~1.8mm로 국부적인

빔 출 력(Power)	속 도(m/min)	최고 온도 범위(℃)	용융 반경(mm)
60kV*60mA	1	700~980	2.2~3
	1.5	600~870	1.2~2.5
	2	430~720	0~1.8
60kV*30mA	0.7	670이하	0~1
	1.5	460이하	0

<표 1> 조건에 따른 온도분포 및 용융 반경

용접이 일어나거나 용접이 되지 않는 경우가 발생할 수 있어 용접조건으로는 적당하지 못하다.

2. 잔류 응력 분포

<그림 2> 에서 볼 수 있는 것처럼 용접이 진행중인 부분에서 열응력이 크게 나타났으며 용접 후 잔류 응력 분포는 그림에서 알 수 있듯이 용접되어진 부분에서만 나타나고 있으며 용접이 진행되면서 이전에 나타난 응력의 영향으로 값이 상승하는 현상은 일어나지 않았다. 또한 용접이 일어나지 않는 용접 조건에서는 용접 후 잔류응력의 영향이 없다는 것을 알 수 있다. 다음 <표 2>는 용접 조건에 따른 잔류응력 값을 나타내고 있는데 값은 모재의 항복강도 대비 51.6~78.8%으로 나타나고 있다. 따라서 잔류응력으로 인한 파괴는 일어나지 않을 것으로 생각된다.

빔 출 력(Power)	속 도(m/min)	잔류응력(kg/㎟)
60kV*60mA	1	최대 17.78~20.3의 분포
	1.5	최대16.24~18.76의 분포
	2	최대 23.66~27.1의 분포
60kV*30mA	0.7	최대18.32~20.43의 분포
	1.5	용접후 분포 없음

<표 2> 조건에 따른 최대 잔류응력 범위 값

3. 구조물의 변형

용접 시 열영향으로 인하여 원통 구조물의 용접길이 방향으로 2mm 이하의 간극으로 맞대어진 부분의 변형을 가져와 용접성을 저하시키거나 y축과 z축 변형이 커 간극이 크게 벌어질 경

우 용접이 어긋나게 된다.

변형에 대한 값은 빔출력과 용접속도에 따른 입열량에 비례하여 차이는 있지만 거동은 비슷하게 나타난다. 결과에서 용접 방향의 x축 변형은 y축과 z축 변형에 비해 용접성 저하에 그리 크게 영향을 끼치지 않는다. y축과 z축의 변형의 크기는 용접이 진행되면서 증가하게 되어 용접되어지는 부분은 음의 변형이 양쪽 측면에서는 양의 변형이 발생하여 어느 용접거리에 도달하면 두 값의 합이 2mm를 넘어 용접의 진행에 지장을 줄 수 있을 것이다. 또한 용접이 진행됨에 따라 변형량의 변동이 나타나는 것을 볼 수 있으며 이는 형상 혹은 치수에 영향을 미칠 것으로 생각된다. 다시 용접이 진행되면 값이 약간 줄어들게 된다.

Ⅳ. 결론

알루미늄합금(Al 2219)의 전자빔 용접에 대하여 상용 유한 요소프로그램인 MARC를 이용하고 이동 열원으로 온도분포, 잔류 응력분포, 변형량을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 빔 출력 60kV×60mA에서 용접속도를 1~1.5m/min 로 용접하면 양호한 용접 조건을 얻을 수 있을 것이다. 유한 요소 해석 결과와 실제 용접 실험 결과를 비교하여 보면 용접속도가 1m/min 의 경우 용접반경이 약 3mm 정도로 해석결과와 잘 일치함을 알 수 있다.

2. 용접 후 잔류 응력 분포는 용접되어진 부분에서만 나타나고 있으며 용접이 진행되면서 이전에 나타난 응력의 영향으로 값이 상승하는 현상은 일어나지 않았다.

3. 용접으로 인한 변형량이 용접성을 저하시키므로 이를 방지하기 위한 JIG를 설치해야할 것으로 생각된다.

Ⅴ. 참고문헌

1. Rosenthal, D. ,"Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting" , Welding J. , Vol. 20, No.5, 1941, 220s-234s

2. Westby, O. , "Temperature Distribution in the Workpiece by Welding" , Dept. of Metallurgy and Metals Working, The Technical Univ. of Norway, Dissertation, 1968.

3. Paley, Z and Hibbert, P. D. , Weld. J. , Vol. 54, No.11, 1975, pp385S.

4. Mazumder, J. and Steen, W. M. , "Heat Transfer Model for CW Laser Material Processing" , J. Appl. Phys. , Vol. 51, No. 2, 1980, pp.941-947.

5. Jae-Do Kim and Chi-Yong Cho, "FEM Simulation of Lap joint in CO_2 Laser Welding of Zn-coated Steel" , Journal of KWS, Vol. 16, No. 1, 1998.

6. S.S. Kang, G.B. Jang and H.K. Kim, "Effect of Root Gap on Residual Stresses and Deformation in the Multi-pass Weld of Thick Plates for steel Bridge" , Journal of KWS. Vol. 17, No. 1, 1999.