

용접개선형상이 잔류응력 분포에 미치는 영향에 관한 연구

Effect of groove shape on residual stress distribution using FEM

김기순*, 손금렬*, 장경복**, 강성수***

* 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

** 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원

*** 부산대학교 기계공학부

1. 서론

구조물의 용접 시에는 용접아크로 인하여 국부적인 용융이 발생하며 급격한 온도 구배로 인한 열팽창 및 수축으로 부재의 자유로운 열변형이 주위의 구속력에 의해 구속되어 용접이 종료된 후에도 재료 내부에 응력이 잔류하게 되고 동시에 변형을 일으킨다. 따라서, 교량과 같은 대형 구조물 제작과정에서 이러한 용접잔류응력과 변형의 발생으로 인하여 치수공차를 유발할 뿐만 아니라 용착금속이나 모재의 균열 등의 원인이 되고 구조물의 강도에 악영향을 미친다.

용접시공 시에 결정해야할 변수로서 용접공정, 용접재료, 용접순서, 용접자세, 용접개선형상, 예열 및 후열 등이 있으며 이러한 변수들이 용접잔류응력 및 변형에 미치는 영향은 매우 크다. 특히, 용접설계 시에 용접개선형상을 결정하게 되는데, 단순히 정적강도의 측면으로만 고려한다면 X형(Double-V-type groove)이음이 가장 양호하나 여러 가지 측면을 동시에 고려하면 그 용도에 따라서 I형(Single-square-type groove)이음, Bevel형(Single-bevel-type groove)이음, V형(Single-V-type groove)이음, U형(Single-U-type groove)등 그 종류가 매우 많다. 그런데, 이렇게 결정된 개선형상은 실제 용접시공 시에 용접 패스와 용접전압, 용접전류를 결정하는 주 요인이 되며 또한 잔류응력분포와 변형에도 큰 영향을 미칠 것이라 생각된다.

따라서 본 연구에서는 용접부 개선형상이 잔류응력분포 및 변형에 미치는 영향을 파악하기 위하여 용접시공 시에 가장 많이 사용되는 Single-V-type groove, Single-bevel-type groove, Double-V-type groove로서 용접공정의 유한요소 해석을 통하여 잔류응력과 변형을 예측하고 비교 고찰하였다.

2. 용접재료 및 용접조건

본 연구에 사용된 피용접재는 교량, 선박, 차량 등의 구조물에 사용되는 용접구조용 열간 압연강재(Rolled steels for Welded Structure)로서 KS D 3515에 표기되어 있는 SM490A이다. 피용접재의 화학성분과 기계적 물성치는 표1과 표2에 나타내었다.

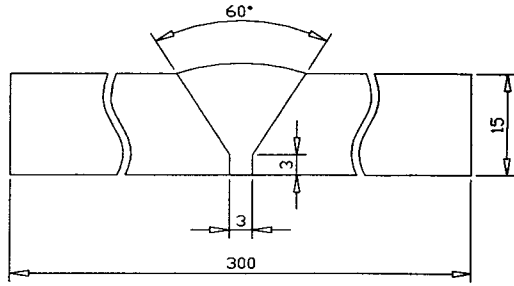
Table 1 Chemical compositions of base metal

Material	Chemical composition (wt%)				
	C	Si	Mn	P	S
SM490A	0.15	0.43	1.45	0.03	0.03

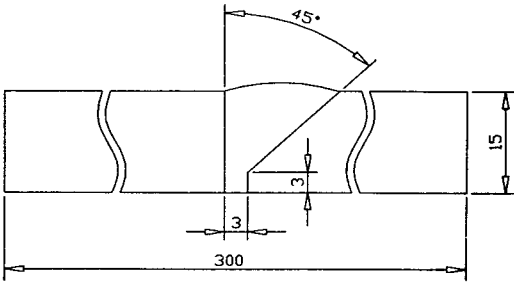
Table 2 Mechanical properties of base metal

Material	Mechanical properties		
	Yield Strength [kg/mm ²]	Tensile Strength [kg/mm ²]	Elongation [%]
SM490A	31.6	50~62	17

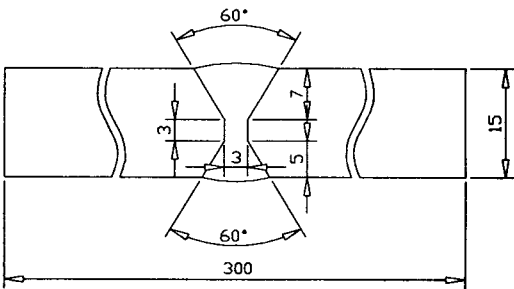
피용접재의 크기는 300×500×15mm(2W×L×h)이며 개선형상은 Single-V-type groove, Single-bevel-type groove, Double-V-type groove이다. 그림1에 본 연구에서 사용된 피용접재의 개선형상과 치수를 나타내고 표 3에 용접조건을 나타내었다. 용접조건과 용접순서는 실제 현장에서 사용되고 있는 용접절차서(Welding Procedure Specification)를 기준으로 설정하였으며 용접공정은 SMAW(Shielded Metal Arc Welding, AC)이다. 그리고, 용접자세는 아래보기(Flat Position) 자세이며 강재 두께가 15mm이기 때문에 예열(Preheating)은 필요로 하지 않는다.



(a) Single-V-type groove



(b) Single-bevel-type groove



(c) Double-V-type groove

Fig. 1 Shape and dimension of welding groove

표3에서 Single-V-type groove와 Single-bevel-type-groove는 1, 2, 3, 4 pass의 순서로 계속해서 비드를 쌓고, Double-V-type groove는 1, 2 pass를 쌓은 후 Back-gauging 하고 후면에 3, 4 pass의 비드를 쌓는다.

3. 유한요소해석

구조물의 용접부에는 용접아크에 의해 높은 열이 발생되며 이로 인하여 불균일한 온도분포와 열응력이 발생하고 용접 후에는 비선형 소성변형으로 인한 잔류응력이 존재하게 되는데, 판 두께가 증가하면 다층용접이 이루어져 복잡한 열사이클에 의해 소성변형의 축적과 이완이 반복되어 복잡한 소성변형 및 잔류응력을 갖게된다. 따라서, 본 연구에서는 용접중에 열전달해석과 응력해석이 동시에 수행되는 커플링해석 (Thermo-mechanical coupling analysis)을 수행하였다.

Table 3 Welding conditions

(a) Single-V-type groove						
Pass No.	Dia. of Electrode [mm]	Welding Current [A]	Welding Voltage [V]	Welding Speed [cm/min]	Width of welded bead [cm]	Surface flux [η VI/bL] [J/cm ²]
1	3.2	125	18	4.7	0.646	2786
2	4	175	21	9.6	1.166	2521
3	4	175	21	9.6	1.512	1944
4	4	178	21	8.8	1.57	1905
Total surface flux energy [J/cm ²]						9156
(b) Single-bevel-type groove						
1	3.2	125	18	4.7	0.6	3000
2	4	175	21	9.6	1.05	2800
3	4	175	21	9.6	1.35	2177
4	4	178	21	8.8	1.57	1905
Total surface flux energy [J/cm ²]						9882
(c) Double-V-type groove						
1	3.2	125	18	4.7	0.7	2571
2	4	178	21	8.8	1.04	2875
-	Gauging					
3	3.2	125	18	4.7	0.58	3103
4	4	175	21	9.6	0.68	4323
Total surface flux energy [J/cm ²]						12872

3.1 해석영역 및 요소형성

용접과정은 급열, 급냉을 동반하기 때문에 용융부나 열영향부를 모델링하기 위해서는 요소의 크기를 매우 작게 해야 할뿐만 아니라 시간중분도 매우 작게 해야 되므로 막대한 해석시간과 저장용량을 필요로 한다. 따라서, 3차원 문제를 단순화시키는 것이 중요하다.

그러므로, 본 연구에서는 다층용접시 발생하는 용접잔류응력 및 변형을 예측하기 위하여 각 단면이 같은 온도변화를 갖는다는 가정 하에 용접선상에 단위길이를 지니는 수직한 단면을 취하여 2차원 해석을 수행하였다. 그리고, 두께방향의 변형을 고려하기 위하여 평면변형률(Plane strain) 가정을 이용하였다.

요소분할(Mesh generation)은 국부적인 입열로 인해 온도구배가 심한 용접부 주변은 보다 미세하게 하고 용융부와 열영향부에서 멀어질수록 해석시간을 단축시키기 위해서 요소의 크기를 증가시켰다. 그리고 해석을 위해서 사용된 요소망은 4절점 사각형 요소(4-node quadrilateral

element)를 사용하였다. 그리고, 해석의 정확성을 높이기 위해서 초층용접 시에 나머지 부분은 비활성요소(deactivated element)로 선정하고 두 번째 층 용접시에는 먼저 용접된 초층부와 두 번째 층의 요소는 활성화되고 나머지 층 부위의 요소는 비활성요소가 되는 형태의 해석기법을 사용하였다.

3.2 경계조건 및 입열모델

열전달해석 시 필요한 경계조건으로서 초기온도는 대기의 온도인 20℃로 설정하였다. 그리고 열의 주로 손실은 전도, 대류 복사에 의해서 이루어지는데 복사율과 자연대류계수는 실질적으로 열해석에 있어서 큰 영향을 미치지 못하므로 일정한 값으로 입력하였다. 그러나 열전도도와 비열은 열전달해석에 매우 큰 영향을 미치므로 해석의 정확성을 위하여 온도의 함수로 입력하였다. 또한, 고상과 액상의 상변화를 잠열의 형태로 고려하였다.

응력해석을 위한 물성치로는 열팽창계수, 탄성계수, 항복응력이 있는데, 온도에 따라서 비선형 거동을 나타내기 때문에 온도의 함수로 입력하였다. 그리고, 재료는 등방성(Isotropic)으로 가정하였고 재료의 항복거동은 폰미세스(Von-mises)의 항복조건을 적용하였다.

응력해석에서 모델의 회전을 방지하기 위한 구속을 경계조건으로 설정해야 되는데, 각 모델 중심에서 윗면과 아래면을 구속하였다.

본 연구에서 용접잔류응력과 변형을 예측하기 위한 입열모델은 이동열원을 고려할 수 있는 램프입력모델(Ramp input model)을 사용하였으며 계산시간을 최소화시키기 위하여 각 용접층간의 냉각 시에 자동으로 최적의 시간증분을 결정하는 Adaptive stepping을 이용하였다. 그리고, 해석의 수렴성을 좋게 하기 위해서 램프비를 100%로 하였다. 층간온도는 100~200℃로 고려하였다.

해석상의 입열량은 2차원 해석이므로 표면입열(Surface flux)을 적용하여 다음과 같이 계산하였다.

$$Q = \eta EI / bL \quad (1)$$

여기서, η 는 아크효율로서 0.8, E는 용접전압(V), I는 용접전류(A), b는 용접비드의 폭이며, L은 입열영역의 용접방향으로의 길이로서 2차원 해석에서는 단위길이다. 각 모델에서 입열이 이루어지는 비드폭과 입열량은 표3에 나타내었다.

4. 결과 및 고찰

4.1 용접잔류응력해석

Fig. 2는 각 type의 개선형태에 따른 잔류응력의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 잔류응력의 분포는 용접후 상온까지 냉각되었을 때의 폰미세스 상당응력으로 나타내었다. 전체적으로 용접부 근처에는 높은 응력이 잔류함을 확인할 수 있다. Single-V-type groove와 Double-V-type groove의 잔류응력은 전체적으로 유사한 분포를 나타내며 용접선을 기준으로 대칭으로 분포하고 있다. 이것은 개선형상이 용접선 중심을 기준으로 대칭을 이루고 있기 때문이라 생각된다. 그리고 Double-V-type groove가 Single-V-groove보다 응력값이 약간 크게 나타나는데, 이것은 Double-V-type groove인 경우 용접공정상 입열량이 커짐에 의해서 기인한다고 생각된다. Single-bevel-type groove는 잔류응력의 분포가 용접선을 기준으로 다른 형태의 groove와 비교하여 약간 오른쪽으로 치우쳐서 분포함을 볼 수 있는데, 이것은 용접 pass가 더해짐에 따라 입열되는 부분이 오른쪽으로 더욱 치우쳐져서 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 온도분포가 비대칭으로 나타나기 때문이라 생각된다.

4.2 용접변형해석

Fig. 4~6은 용접이 진행되는 동안 용접모재의 끝부분 좌우측에서의 두께방향 변위를 나타낸 것이다. 그림에서 Single-V-type groove와 Double-V-type groove는 좌, 우측 모두 동일하게 변화하고 있음을 알 수 있다. 그러나, Double-V-type groove의 최종 변위는 거의 0에 가깝다. 이것은 1, 2 pass동안에 변위가 (-)의 값을 가지는데, 반대쪽에 3, 4 pass의 용접을 행함으로써 역방향으로 변위가 발생하여 나타나는 현상이라고 생각된다. 따라서, 용접변형의 방지를 위해서 Double-V-type groove를 사용하는 것이 유리하다고 생각된다. 그리고, Single-bevel-type groove의 경우는 좌측은 (+)방향의, 우측은 (-)방향의 변위를 나타내고 있다. 따라서, 이러한 형태의 개선은 변형측면에서 매우 나쁘다고 생각된다.

5. 결론

용접잔류응력과 변형은 열사이클에 의해서 지배되며 열사이클이 대칭인 Single-V-type groove와 Double-type-groove는 잔류응력과 변

형 모두 대칭의 분포를 나타내었으며 Double-V-type groove의 경우 1, 2 pass 용접후 반대쪽에 3, 4 pass의 용접이 됨에 따라서 역방향으로 변형하여 최종적으로 변형이 거의 없는 형태를 나타내기 때문에 변형의 측면에서는 Double-V-type groove의 경우가 가장 양호함을 알 수 있다.

6. 참고문헌

1. Koichi Masubuchi : "Analysis of welded structure", pergamon press
2. 삼성중공업 용접시공서(WPS)
3. 심용래 : "유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석", 대한용접학회지, 1997, 제15권, 제1호, pp. 15-25
4. J. K. Hong, C.-L. Tsai, P. Dong : "Assessment of numerical procedures for residual stress analysis of multipass welds", Welding Journal, 1998(9), pp. 372-382
5. Y. Shim, Z. Feng, C.-L. Tsai : "Determination of residual stresses in thick-section weldment", Welding Journal, 1992(9), pp. 305-312

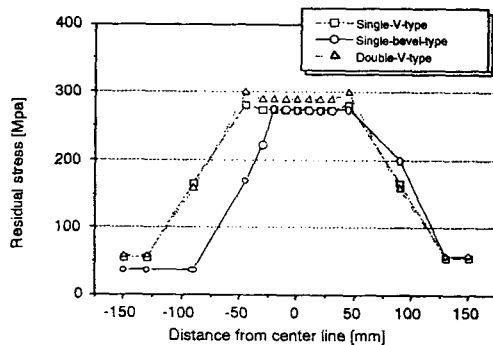


Fig. 2 Residual stress distribution obtained by analysis

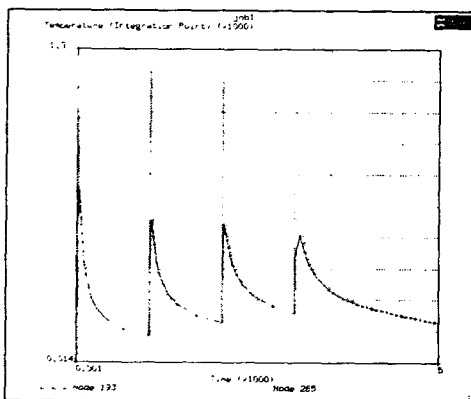


Fig. 3 Temperature cycle on Single-bevel-type groove
[Distance from center line : 10mm]

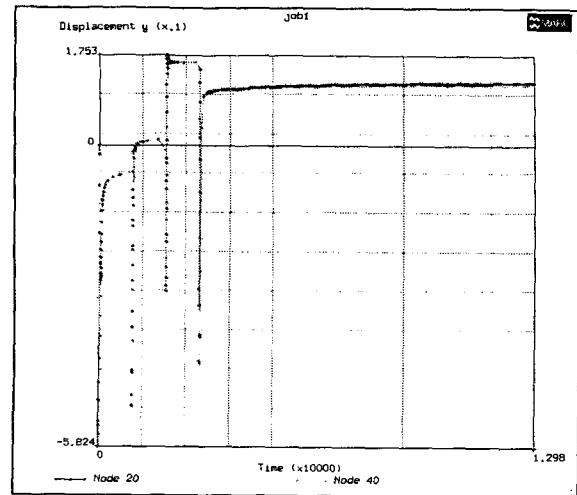


Fig. 4 Variation of y-displacement with time on the end of weldment ; Single-V-type groove

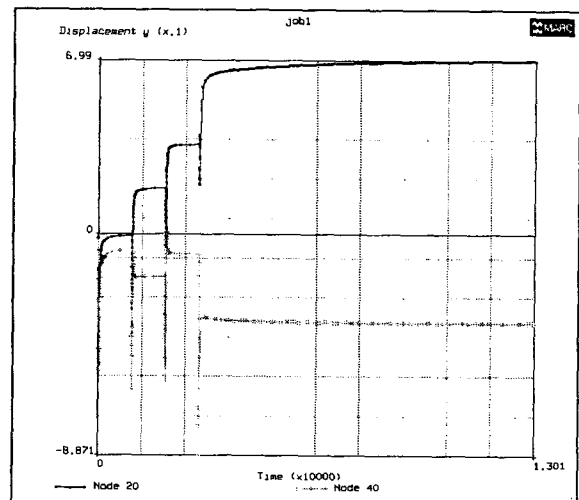


Fig. 5 Variation of y-displacement with time on the end of weldment ; Single-bevel-type groove

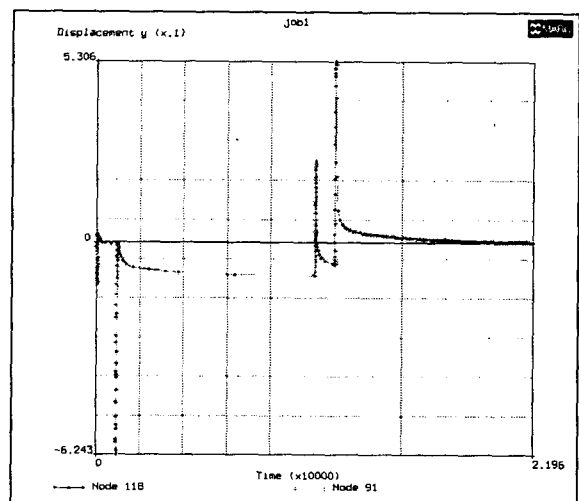


Fig. 6 Variation of y-displacement with time on the end of weldment ; Double-V-type groove