

용접부의 균열진전에 따른 잔류응력 재분포 해석

Numerical Analysis of Residual Stress Redistribution due to Fatigue Crack Propagation of Weld Zone

이동형*, 구병춘*

Lee Dong-Hyong, Goo Byeong-choon

ABSTRACT

The problem of welding stresses and fatigue behavior is the main concerns of welding research fields. The residual stresses and distortion of structures by welding is exert negative effect on the safety of mechanical structures. That is, expansion of material by high temperature and distortion by cooling during welding process is caused of tensile and compressive residual stresses on welding material, and this residual stresses reduce fracture and fatigue strength of welding structures. The accurate prediction of residual stress and redistribution due to fatigue crack propagation of weld zone is very important to improve the quality of weldment. In this study, a finite element modeling technique is developed to simulate the redistribution of residual stresses due to fatigue crack propagation of weld zone.

Keywords : Welding(용접), Weld Zone(용접부), Residual Stress(잔류응력), Residual Stress Redistribution(잔류응력 재분포), Fatigue Crack Propagation(피로균열 진전)

1. 서 론

구조물의 접합방법으로 용접이 사용되면서 작업의 용이성, 구조물의 단순화, 기밀의 우수성 등의 장점 때문에 철도, 교량, 선박 등 많은 기계 구조물 제작에 이용되고 있다. 그러나, 일반적으로 용접현상은 국부적으로 단시간에 가열, 냉각 되기 때문에 용접부는 변형 수축이 발생하고, 용접한 재료에 잔류응력이 생겨 구조물의 균열 발생 또는 균열 전파에 직·간접적으로 기여하므로 안전성에 악영향을 미치게 된다. 용접시 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키며, 발생된 인장 잔류응력은 용접 구조물의 파괴 및 피로강도를 크게 저하시키는 요인이 되고 있다.

용접에 의한 잔류응력의 분포를 평가하는 방법으로는 이론적 해석 방법과 실험적 측정방법이 있으며, 수치해석의 발달로 유한요소법을 사용한 용접 잔류응력 해석에 대한 많은 연구가 진행되고 있으나, 용접부 잔류응력 해석은 복잡한 열탄소성 과정을 해석해야 하고, 온도에 따른 비선형성인 재료의 기계적 성질이 있으므로 실제 용접 상태를 해석하기 위한 많은 연구가 필요하다. 또한, 용접부위의 잔류응력장에서 피로균열이 진전할 때 잔류응력은 작용하중의 크기와 반복수, 균열진전 등으로 인하여 재분포 된다.

따라서, 본 연구에서는 용접부를 유한요소법으로 모델링하여 잔류응력분포를 해석하고 균열 진전시 잔류응력의 재분포 특성을 파악하고자 하며, 본 해석의 계산은 상용 유한요소해석 프로그램인 'ABAQUS'를 이용하였다.

* 한국철도기술연구원 차량기계연구본부 선임연구원, 정회원

2. 유한요소해석

2.1 해석모델

용접부의 온도분포 및 잔류응력 해석을 수행하기 위한 시편은 ASTM E 647-03에 따라 설계하였으며, Fig. 1 과 같다. 열유동해석 및 열응력 해석에 사용한 모델은 이 CT(compact tension)시편이 상하 대칭이므로 시편의 1/2을 해석대상으로 선정하였다. 또한, 용접부의 정확한 해석을 수행하기 위하여 실질적으로 3차원 해석을 수행하여야 하지만, 과도한 계산시간이 요구되고 용접시 두께방향의 열전달이 용접부 전체의 온도분포에 큰 영향을 미치지 않으므로 2차원 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 모델은 Fig.2와 같이 8절점 평면응력 요소를 사용하여 230개의 요소와 838개의 절점으로 구성하였으며, 높은 온도구배를 가지는 영역은 조밀하게 구성하였다.

해석에 사용된 용접조건은 Table 1 과 같고, 용접물에 전달된 입열량은 다음과 같이 계산하였다.

$$H = \eta EI / V \quad (1)$$

여기에서, η : 용접아크 효율, [%]
 E : 아크 전압, [Volts]
 I : 아크 전류, [Amperes]
 V : 용접아크의 이동속도, [mm/sec]
 H : 입열량, [J/mm] 이다.

대상으로 한 용접방법은 철도차량 대차 제작에 많이 사용하고 있는 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 용접이고 사용된 소재는 용접구조용 압연 강재(SWS490A)이며, 화학 성분과 기계적 성질은 Table 2, Table 3 과 같다.

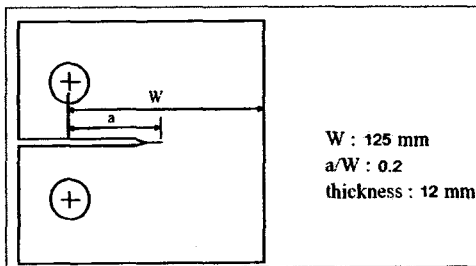


Fig. 1. Geometry and dimensions of CT specimens

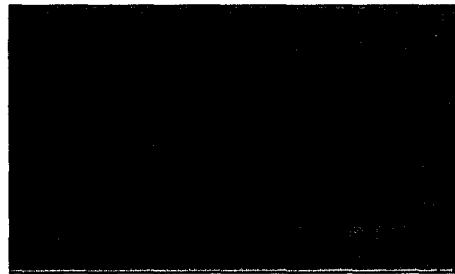


Fig. 2. Finite element mesh for 2D heat flow analysis

Table 1. Welding conditions

Plate Thickness	12 mm
Material	SWS490A
Wire Size	ϕ 1.2
Welding Speed	20 ~ 40 cm/min
Voltage	27 ~ 35 V
Amperage	280 ~ 350 A
Heat source efficiency	0.8

Table 2. Chemical composition of SWS490A steel

(unit : %)				
C	Si	Mn	P	S
0.20max.	0.55max.	1.60max.	0.035max.	0.035max.

Table 3. Mechanical properties of SWS490A steel

yield strength (N/mm ²)	tensile strength (N/mm ²)	elongation (%)
325 min.	490 ~ 610	17 min.

2.2 해석방법

용접현상의 열전달 해석에 사용한 열원의 형태는 가우시안 분포를 이용한 표면열원을 많이 사용하고 있으나, 용접부 근처의 국부적인 부분의 온도분포에 영향을 미치며 어느 정도 떨어진 위치에서는 크게 영향을 미치지 못하므로⁽¹⁾, 사용하기에 편리한 균일하게 분포된 표면열원(surface flux)를 사용하였다.

용접현상을 모의하기 위하여 용접되는 부분은 요소 생성(element birth) 방법을 사용하였고 용접속도와 같은 속도로 이동하는 열원 (distributed heat flux)을 고려하였다.

또한, 고온에서 용융부의 고상과 액상의 상변화 효과를 반영하기 위하여 잠열(latent heat)을 고려하였다. 열전달 해석시 정확한 재료의 물성치가 필요하나 실험데이터를 구하기 힘들기 때문에 기존 연구자료⁽⁷⁾의 연강 재료 물성치를 이용하였고 적용한 재료의 온도에 따른 열적 물성치는 Fig. 3 과 같다. 좌, 우 및 상면의 경계조건으로 자연대류경계조건을 적용하였으며, 주위온도는 20°C로 설정하였다.

열전달 해석을 통하여 열원이 이동하는 동안의 온도분포를 각 시간단계에서 계산한 후, 이 과도 온도분포를 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 용접 후 발생하는 잔류응력을 계산하였다. 열탄소성 해석에 사용되는 온도에 따른 재료 물성치도 기존 연구자료⁽⁷⁾의 연강 재료 물성치를 이용하였고, Fig. 4 와 같이 재료의 등방성을 고려하여 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였다. 경계조건으로는 상하 대칭면에 대칭조건 및 y방향으로의 변위를 고정하고, 면내 회전을 방지하기 위하여 모델 좌측 두지점에 x축방향의 변위를 고정하였다.

균열진전 해석은 잔류응력해석 결과를 초기조건으로 하고 Fig. 5와 같이 대칭면의 경계조건을 균열진전방향으로 하나씩 제거하면서 수행하였으며, 균열길이를 5mm씩 증가시키면서 노치에서부터 25mm까지 균열이 진전할 때까지의 잔류응력을 해석하였다.

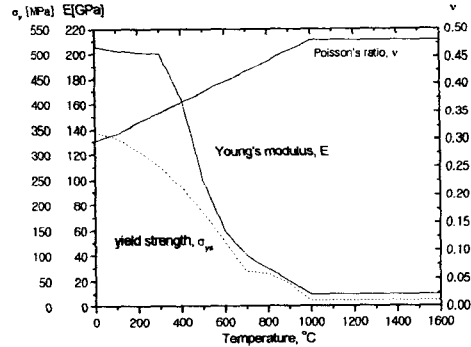
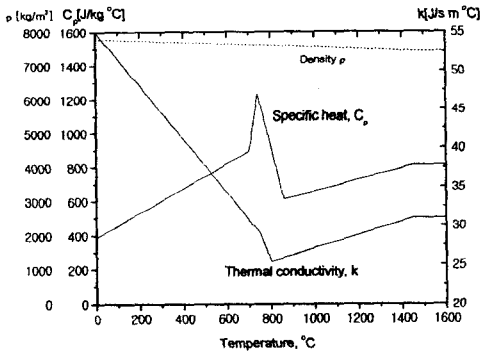


Fig. 3. Material properties for heat transfer analysis Fig. 4. Material Properties for thermal stress analysis

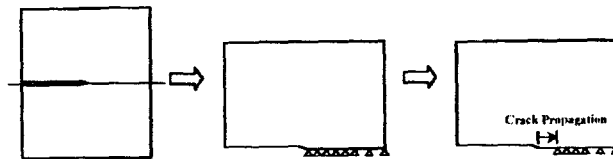


Fig. 5 Modeling of crack propagation

3. 해석결과 및 검토

3.1 용접 해석 결과 검토

Fig. 6 은 과도 열전달 해석에 의한 용접 개시후 4초, 10초, 14초, 20초의 온도변화를 나타내고 있으며, Fig. 7은 시편폭의 중앙에서 용접부와의 거리가 10, 23, 30, 50mm 떨어진 위치에서 시간에 따른 온도변화를 나타내고 있다.

용접이 끝난후 냉각을 거쳐 정상상태가 된 후 용접선 방향의 잔류응력 분포(σ_{xx})는 Fig. 7과 같고, 용접선 수직방향의 잔류응력 분포(σ_{yy}) Fig. 8과 같다. 용접선 방향의 잔류응력 분포와 용접선 수직방향의 잔류응력 분포 결과는 기존연구 자료⁽²⁾와 경향이 잘 일치하고 있다.

Fig. 10은 시편폭의 중앙에서 용접방향과 수직인 위치(Fig. 3에서 A-B 선)의 용접선 방향의 응력 분포(σ_{xx}) 해석 결과이고, Fig. 11은 같은 위치에서 용접선 수직방향 응력 분포(σ_{yy}) 해석 결과이다. 해석 결과를 기존 연구자료의 실험결과⁽²⁾와 비교하기 위하여 잔류응력을 항복강도로 나누어 무차원화 하였으며, 실험조건(용접속도, 입열량)이 해석조건과 약간 차이가 있기 때문에 해석결과와 약간의 차이가 있기는 하지만 위치별 잔류응력 분포는 잘 일치하고 있다. 즉, 이 위치에서의 잔류응력은 용접선에 가까운 부분에서 용접선 방향의 인장 잔류응력이 가장 크고, 최대값은 재료 항복강도의 약 1.08배가 된다. 일반적으로 연강을 맞댐용접한 경우 무차원화된 잔류응력의 최대값은 1.0~1.1 사이⁽³⁾이므로 해석된 인장 잔류응력 최대치는 타당성이 있다.

Fig. 12는 용접선에서 10mm 떨어진 위치(Fig. 3에서 C-D 선)의 용접선 방향 응력분포(σ_{xx})를 무차원화 한 결과이고, Fig. 13는 같은 위치에서 용접선 수직 방향의 응력분포(σ_{yy})를 무차원화한 결과이다. 해석 결과를 기존 연구자료의 실험결과⁽²⁾와 비교하면, 약간의 차이가 발생하지만 이는 실험조건과 해석조건과의 차이로 인한 것으로 판단된다. 그러나, 용접후 나타나는 잔류응력은 용접선 방향의 응력이 용접선 수직방향의 응력보다 크게 나타나고, 용접부의 중앙 위치에서 가장 큰 인장 잔류응력이 생기는 것은 일치함을 알 수 있다.

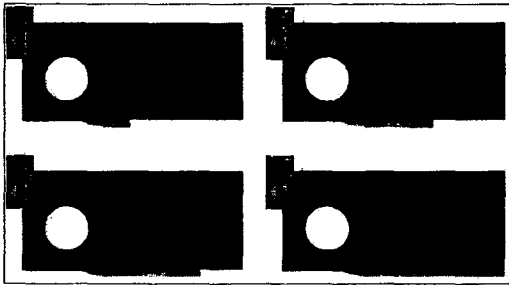


Fig. 6. Temperature change in welding process (4s, 10s, 14s, 20s after welding)

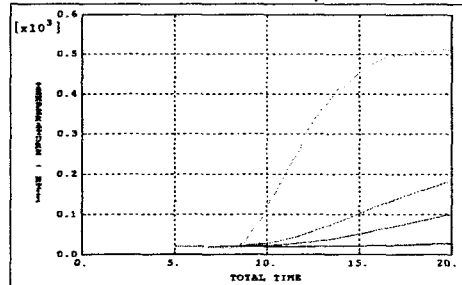


Fig. 7. Temperature change rates in 10, 23, 35, 50 mm position from center line

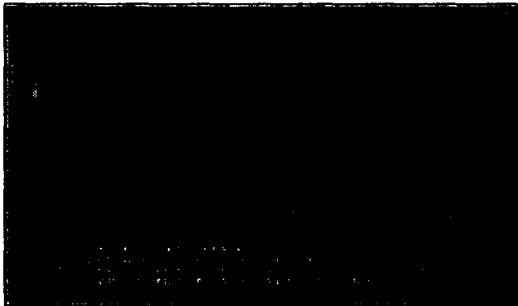


Fig. 8. Longitudinal residual stress distribution



Fig. 9. Transverse residual stress distribution

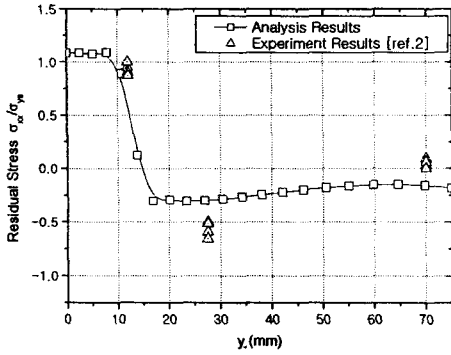


Fig. 10. Residual stress σ_{xx} along A-B

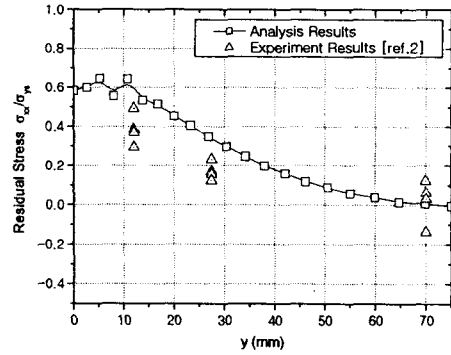


Fig. 11. Residual stress σ_{vv} along A-B

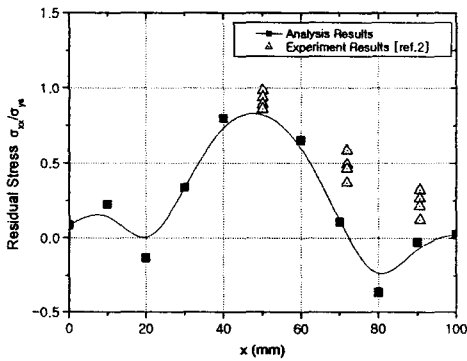


Fig. 12. Residual stress σ_{xx} along C-D

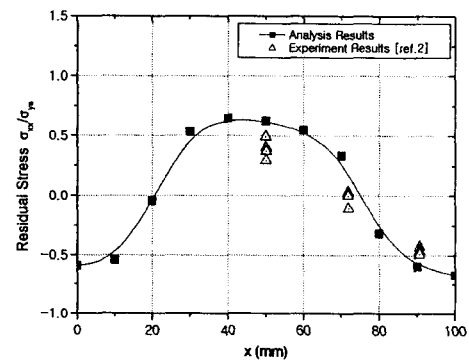


Fig. 13. Residual stress σ_{vv} along C-D

3.1 균열진전 해석 결과 및 검토

일반적으로 잔류응력장에서 피로균열이 진전할 때 잔류응력은 작용하중, 반복수, 균열진전 등에 의해 재분포되며, 본 해석에서는 균열진전을 고려하여 잔류응력 재분포를 해석하였다.

Fig. 14는 용접선을 따라 균열이 진전할 때 용접선 방향의 잔류응력(σ_{xx})의 재분포 해석 결과이고, Fig. 15는 용접선에 수직인 방향의 잔류응력(σ_{yy})의 재분포 해석결과이다. Fig. 14 및 Fig. 15의 해석결과를 보면 초기의 잔류응력은 중앙에서 인장응력, 끝단에서는 압축응력을 나타내고 있고, 압축 잔류응력장에서 균열이 차츰 전파할수록 균열선단에서의 압축응력은 거의 일정한 값을 나타내며, 인장 잔류응력장에서는 잔류응력이 이완되어 인장의 최대값이 감소하는 것을 보여준다.

Fig. 16는 용접선을 따라 균열이 진전할 때 시편폭의 중앙에서 용접방향과 수직인 위치(Fig. 3에서 A-B 선)의 용접선 방향의 잔류응력 재분포(σ_{xx}) 해석 결과이고, Fig. 17는 용접선에 수직인 방향의 잔류응력(σ_{yy})의 재분포 해석결과이며, 인장 잔류응력장에서 잔류응력이 이완되어 인장의 최대값이 감소하는 것을 나타내고 있다.

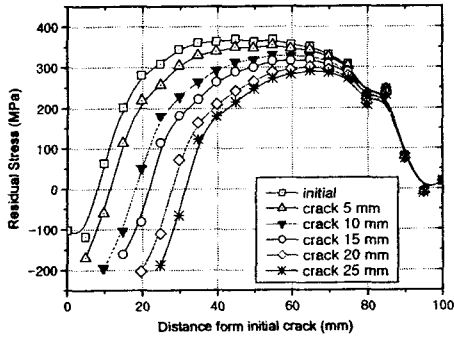


Fig. 14. Analysis results of residual stress redistribution(σ_{xx}) due to crack propagation

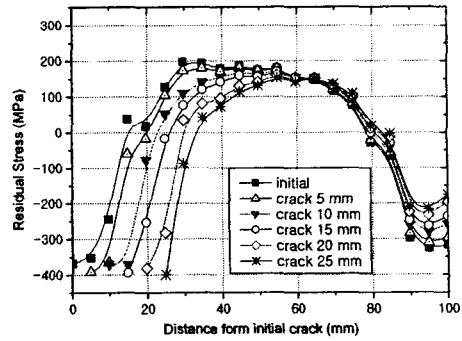


Fig. 15. Analysis results of residual stress redistribution(σ_{yy}) due to crack propagation

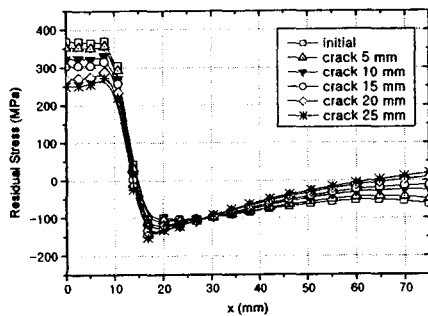


Fig. 16. Analysis results of residual stress redistribution(σ_{xx}) due to crack propagation

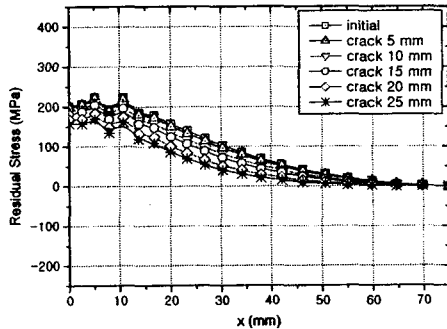


Fig. 17. Analysis results of residual stress redistribution(σ_{yy}) due to crack propagation

4. 결론 및 향후과제

GMAW 용접공정을 용접부 열유동 및 잔류응력 해석, 균열진전 해석을 통한 잔류응력 재분포에 대하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) GMAW 용접공정에 대한 온도해석에 있어 두께방향의 열전달을 무시한 2차원 해석 결과가 기존 연구자료의 실험결과와 비교적 근접한 결과를 얻을 수 있었다.

(2) 열탄소성 해석을 통한 잔류응력의 해석 결과 용접선 방향의 인장 잔류응력은 용접부위가 다른 곳보다 크게 나타나고, 용접부위 중앙에서 가장 크며 중앙에서 멀어질수록 감소하는 경향이 있으며, 기존 연구자료의 실험결과와 경향이 잘 일치하였다.

(3) 균열진전으로 인한 잔류응력의 재분포에 대한 해석 결과, 압축 잔류응력장에서 균열이 차츰 전파할수록 균열선단에서의 압축응력은 거의 일정한 값을 나타내며, 인장 잔류응력장에서는 잔류응력이 이완되어 인장의 최대값이 감소한다.

향후, 해석결과와 같은 조건의 실험을 통하여 잔류응력 분포 및 균열진전시 잔류응력의 재분포에 대한 연구를 수행하여, 이 방법이 용접구조물의 잔류응력 예측과 균열성장에 미치는 잔류응력의 영향 및 잔류응력 재분포 해석에 타당성이 있음을 검증할 예정이다.

후기

본 연구는 2002년도 과학기술부 국가지정연구실사업인 “철도차량 구조물의 잔존수명 평가 기술 개발”의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이다.

[참고문헌]

- (1) 심용래, 1997, 유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석, 대한용접학회지, 제 15권, 제1호, pp.15~25
- (2) 이동욱, 1995, 유한요소법을 이용한 GMAW의 열탄소성 모델링, 서울대학교 박사학위논문
- (3) 이윤경 역, 1996, 용접·접합공학 편람-일본용접학회편, 도서출판 과학기술, pp.30~33
- (4) 석창성, 김수용, 박지홍, 1999, 용접부의 잔류응력 및 피로균열성장 거동해석, 대한기계학회논문집A권, 제23권 제9호, pp.1516~1524
- (5) Ha Cheol Song, Chang Doo Jang, 1999, Numerical Modeling for the Analysis of Residual Stress Redistribution due to Fatigue Crack Propagation, Proceedings of the thirteenth Asian Technical Exchange and Advisory Meeting on Marine Structure, pp.205~212
- (6) Sindo Kou, 1987, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons
- (7) Artem Pilipenko, 2001, Computer simulation of residual stress and distortion of thick plates in multi-electrode submerged arc welding. Their mitigation techniques, Ph. D Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Trondheim, Norway
- (8) ASTM E647-95a, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates
- (9) ASTM E837-92, Standard Test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method
- (10) ABAQUS version 5.8, 1997, ABAQUS user's manual, Vol.1, Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc.