

# 기계적인 하중에 의한 용접부 잔류응력의 이완에 관한 해석

## Numerical Analysis on Residual Stress relaxation by mechanical loading

서정원\*, 구병춘\*, 이동형\*, 정흥채\*  
Seo, Jung-Won, Goo, Byeung-Choon, Lee, Dong-Hyeong, Chung Heung-Chai

**ABSTRACT** : Welding residual stresses are the main topics of welding research fields. The residual stresses and distortion of structures by welding exert negative effect on the safety of mechanical structures. That is, expansion of material by high temperature and distortion by cooling during welding process are caused by tensile and compressive residual stresses in welding material, and this residual stresses can induce fracture and fatigue problems of welding structures. The accurate prediction of residual stress and relaxation due to mechanical loading 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 relaxation of residual stresses due to mechanical loading. The effects of load ratio for static and cyclic loading are evaluated based on analytical results.

### 1. 서론

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, 발생한 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 용접에 의해 발생하는 잔류응력은 외부의 하중에 의하여 그 크기가 완화가 된다고 알려져 있으므로 수명평가지 이를 고려하여야한다. 지금까지 잔류응력의 이완에 대한 연구는 주로 실험적으로 평가되었고 정량적인 이완에 대한 식들이 제시되었다. 그러나 잔류응력의 이완에 영향을 미치는 인자로서 최대하중, 응력비 등이 있으며 주로 최대하중의 영향에 대하여 실험을 실시하여 평가하였다.

본 논문에서는 응력비에 대한 영향을 실험적으로 평가하기에는 많은 비용과 시간이 필요하므로 잔류응력의 이완에 대하여 응력비에 대한 영향을 해석적으로 평가하였다.

\* 한국철도기술연구원, 정희원

## 2. 용접시 잔류응력 해석

### 2.1 해석 모델

용접시 발생하는 잔류응력에 대해 기계적인 하중에 의한 이완을 살펴보기 위해서 우선 용접에 대한 잔류응력 해석을 수행하였다. 해석대상은 기존의 연구자들이 수행한 시험편으로 Fig 1과 같다.

Fig. 1은 해석에 사용된 모델이며 용접라인을 따라서 대칭이므로 1/2로 모델을 하였으며 형상을 단순화 시켰다. 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 8절점 평면응력 요소를 사용하였다.

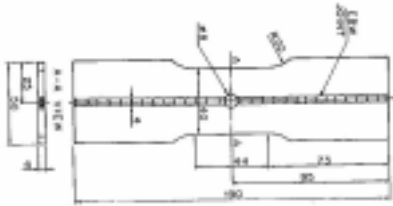


Fig. 1 해석대상

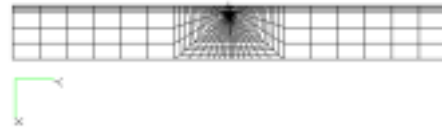


Fig. 2 해석을 위한 FEM 모델

### 2.2 해석 방법

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 재료의 온도에 따른 열적 물성치를 고려하였고, 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. 재료의 등방성을 고려하여 탄성 및 소성 전영역에 걸쳐 재료 물성치의 온도 의존성을 고려하였다.

### 2.3 해석결과

용접잔류응력의 생성을 위하여 용접해석을 실시하였고 노치부의 생성을 위하여 Hole에 해당하는 요소를 제거하였다. Fig. 3은 노치의 생성을 위하여 요소를 제거한 모습이며 이때의 길이방향의 잔류응력분포를 나타내고 있다. Fig. 4은 노치 생성 전후의 잔류응력 분포 모습을 나타내고 있으며 노치 제거 후 잔류응력이 재 분포 됨을 알 수 있다. 이러한 최종의 잔류응력 분포를 가지고 잔류응력 이완의 초기조건으로 하였다. 해석 대상은 노치부의 응력 집중계수는  $K_t = 2.49$ 이다.

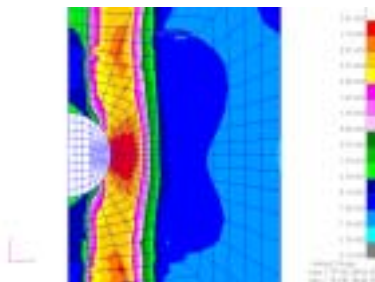


Fig. 3 노치부 생성후 잔류응력 분포

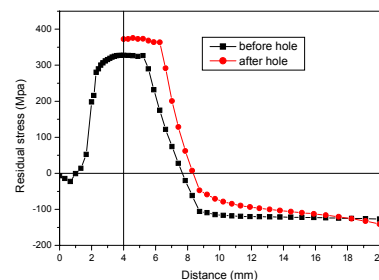


Fig. 4 노치부 생성전후의 잔류응력 분포

### 3. 정하중 시 잔류응력 이완

#### 3.1 하중크기의 영향

최대 하중의 크기에 따른 잔류응력의 이완을 나타내면 다음과 같다. 이때 조건은 R=0 이다. 그림에서 잔류응력의 완화는 응력집중이 가장 크게 발생하는 Hole 끝단에서부터 급격히 변화함을 알 수 있다. 특히 끝단에서 2mm 사이에서 급격히 변화한다. 잔류응력은 하중이 200Mpa 이전에는 선형적으로 변화하다 그 이후에서는 변화가 둔화된다. 이는 잔류응력이 완화되어서 압축잔류응력으로 변화하고 이 크기가 압축 시 항복강도를 넘어서게 되며 이로 인하여 선형적으로 이완되지 않는다. 이를 그림으로 나타내면 Fig. 7과 같다. 하중이 200Mpa 일 경우에는 잔류응력 완화가 압축항복강도를 넘어서지 않았기 때문에 비례적으로 감소하지만 250Mpa 일 경우에는 압축항복강도를 넘어서기 때문에 선형적으로 감소하지 않는다. 잔류응력 이완을 정량적으로 평가하기 위하여 타 연구자가 제시한 식에 대하여 검토하였다.<sup>(5)</sup>

$$(\sigma_{res})_{lcycle}/(\sigma_{res})_{ini} = -1.6[ ((\sigma_{res})_{ini} + \sigma_{app})/\sigma_y ] + 2.6$$

여기서,  $(\sigma_{res})_{lcycle}$  : 정하중 후 잔류응력,  $(\sigma_{res})_{ini}$  : 초기 잔류응력

$\sigma_{app}$  : 작용하중,  $\sigma_y$  : 항복강도

이 식에서 a = -1.6 및 b = 2.6은 재료에 의존하는 재료상수이며 실험적으로 구한 값이다. 본 해석을 통하여 각각의 위치에서 잔류응력 이완에 대하여 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다. 그림에서와 같이 각각의 위치에서 잔류응력이완 데이터가 선형적으로 하나의 직선에 모이며 이를 곡선 적합하여 상수로 나타내면 a = -0.87, b=1.88로 나타낼 수 있다.

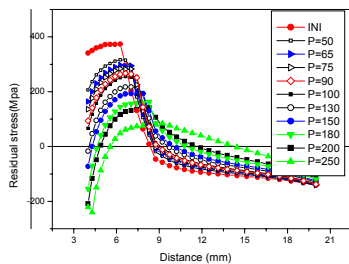


Fig. 5 하중크기에 따른 잔류응력의 변화

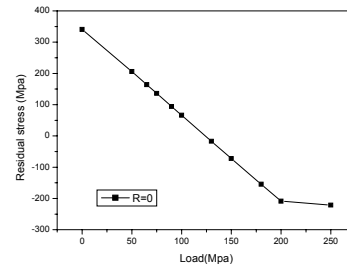


Fig. 6 Hole 끝단에서의 잔류응력의 변화

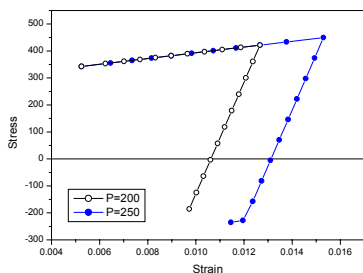


Fig. 7 Stress-strain Curve

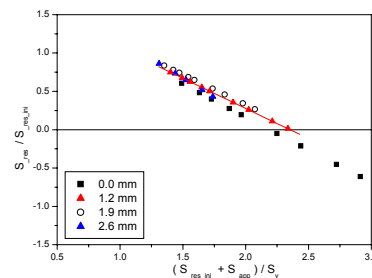


Fig. 8 정하중 시 잔류응력 이완

#### 3.2 하중 비의 영향

실질적으로 구조물의 경우에는 다양한 하중을 받고 있으므로 인장하중을 받는 경우와 인장 및 압축하중을 받는 경우에 대하여 잔류응력의 이완량을 평가하였다.

Fig. 9는 인장하중을 받는 경우와 인장 및 압축하중을 받는 경우에 대한 잔류응력의 재분포를

나타내고 있다. 그림에 R=0은 인장하중 200 Mpa을 준 후 하중을 제거한 경우이고, R=-1 인 경우는 인장하중 200Mpa을 준 후 다시 압축하중 -200Mpa을 준 경우이다. 그림에서와 같이 인장 및 압축 하중을 준 경우에는 끝단에서 2mm 이후에는 잔류응력이 이완 되었으나 끝단에서는 다시 잔류응력이 크게 생성되었다. 이는 Fig. 10-11에서와 같이 인장하중을 가한 후 제거할 경우에는 잔류응력이 이완되나 다시 압축하중을 가하고 압축항복강도를 넘어서면 반대방향의 잔류응력이 생성된다.

Fig. 12-13은 하중비가 R=-1 일 경우에 하중의 크기에 따른 잔류응력의 이완을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 하중의 크기가 작을 경우에는 전반적으로 잔류응력이 이완되는 현상을 나타내고 있으나 어느 하중이상의 경우에는 Hole 끝단에서는 다시 잔류응력이 커지고 있다. Fig. 14는 Hole 끝단에서의 하중비에 따른 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 최대하중이 100Mpa 까지는 하중비에 상관 없이 선형적으로 감소하다 그 이후에는 R=0인 경우에는 선형적으로 감소하나 R=-1 인 경우에는 다시 증가하고 있다.

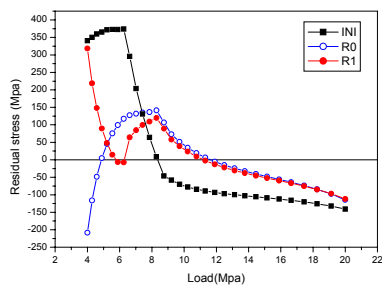


Fig. 9 하중비에 따른 잔류응력 이완

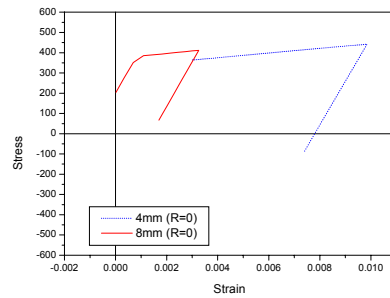


Fig. 10 R=0 일 경우의  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선

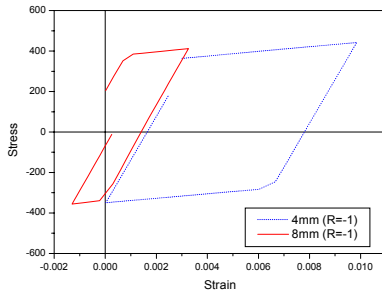


Fig. 11 R=-1 일 경우의  $\sigma$ - $\epsilon$  곡선

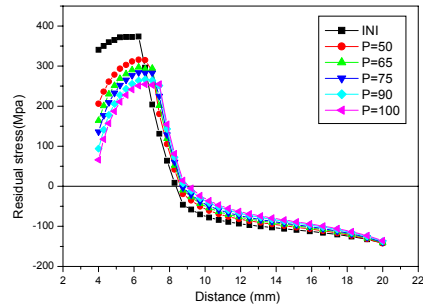


Fig. 12 R=-1 일 경우 잔류응력 이완(1)

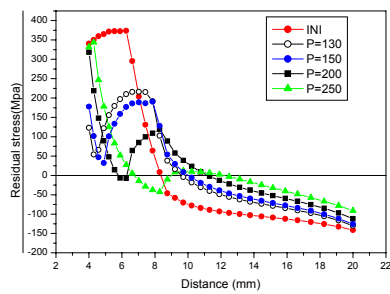


Fig. 13 R=-1 일 경우 잔류응력 이완(2)

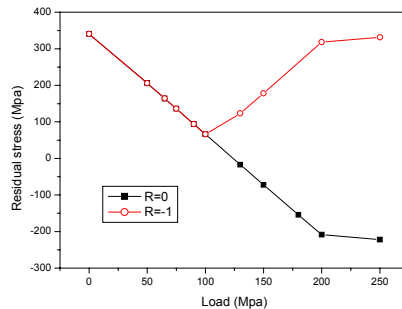


Fig. 14 Hole 끝단에서의 잔류응력 이완

#### 4. 싸이클에 따른 잔류응력 이완

잔류응력의 이완은 같은 크기의 반복적인 하중이 작용할 경우에 초기 하중에 의하여 많은 양의 잔류응력이 이완되고 그 이후에는 싸이클에 따라서 서서히 이완된다고 알려져 있다. 이러한 싸이클에 의한 이완 현상은 *Cycling Hardening*의 변화와 평균응력의 변화에 의하여 생성된다. 따라서 이러한 현상은 *Nonlinear isoparametric/kinematic hardening* 조건을 사용하여 묘사할 수 있다. Fig. 15는  $R=-1$  일 경우의 싸이클에 따른  $\sigma-\varepsilon$  곡선을 나타내고 있으며 그림과 같이 *kinematic hardening* 조건에 의하여 압축시 항복강도가 작게 됨을 알 수 있다. Fig. 16은 하중진폭은 일정하게 하고 최대하중의 크기를 달리 할 경우 싸이클에 따른 잔류응력의 이완을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 첫 번째 하중에서 가장 많이 잔류응력이 이완되고 그 이후에는 싸이클에 따라서 잔류응력이 서서히 이완됨을 알 수 있다.

Fig. 17은 첫 번째 잔류응력의 이완을 제외한 경우의 하중의 크기에 따른 잔류응력의 이완량을 나타내고 있다. 그림에서와 같이 동일한 하중비를 갖고 있으며 진폭이 커질 경우 이완량이 증가함을 알 수 있고, 동일한 진폭을 갖고 하중비가 다를 경우, 즉  $R=0$  일 경우가 더 많이 이완되었다. Fig. 18은 초기의 잔류응력은 같게 하고 100 싸이클 이후의 잔류응력의 이완량을 나타낸 것으로 각각의 하중비에 따라서 하중이 증가함에 따라 잔류응력의 이완이 선형적이지 않음을 알 수 있다. Fig. 19는 진폭은 동일하고 하중비를 변화시켜가면서 잔류응력의 이완량을 평가한 것으로 하중비가  $R=-1$  일 부근에서는 이완량이 크기 않지만  $R=0$ 으로 가면서 급격히 증가하였다. 이는 같은 진폭이더라도 하중비가  $R=0$  근방에서는 급격히 잔류응력의 완화가 발생하였다. Fig. 20은 100 싸이클에서의 하중비에 따른 잔류응력의 이완량을 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 하중비가 -1에서 0.1로 갈수록 많은 양이 이완됨을 알 수 있다.

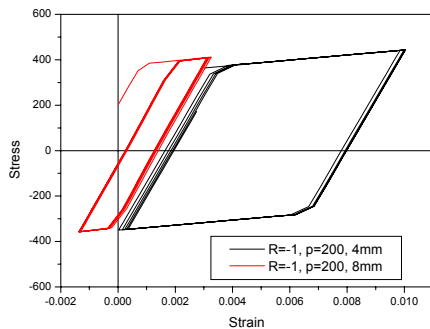


Fig. 15 반복하중에 따른  $\sigma-\varepsilon$  곡선

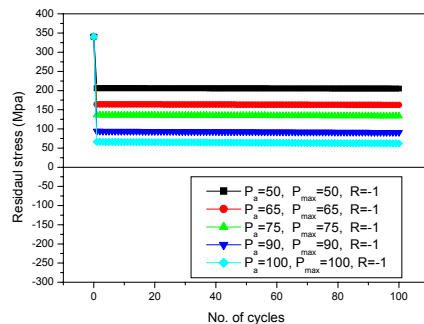


Fig. 16 싸이클에 따른 잔류응력 이완 ( $R=-1$ )

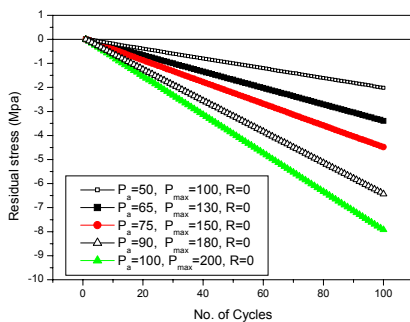


Fig. 17 싸이클에 따른 잔류응력 이완 ( $R=0$ )

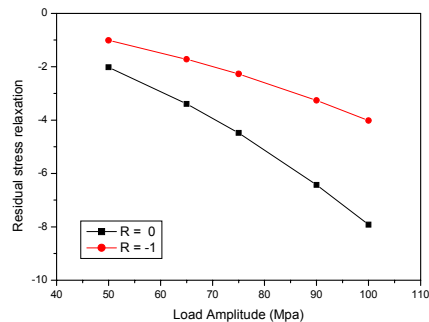


Fig. 18 하중크기에 따른 잔류응력 이완량

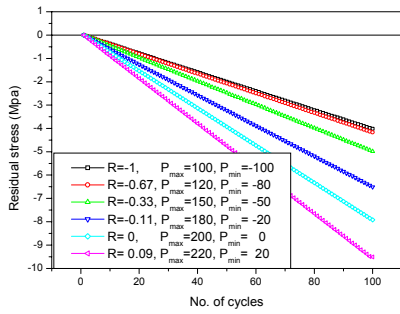


Fig. 19 하중비에 따른 잔류응력 이완

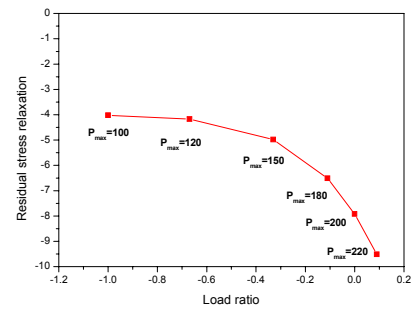


Fig. 20 하중비에 따른 잔류응력 이완

## 5. 결론

하중비 및 사이클에 따른 잔류응력이완을 살펴보기 위하여 해석을 수행하였으며 이로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정하중시 잔류응력은 하중이 증가함에 따른 비례적으로 이완하였으며, 하중비가 R=0 보다 R=-1 이 이완량이 더 작았다.
2. 사이클에 따른 잔류응력의 이완 역시 작용하중이 커질수록 이완량이 많았으며 하중비가 R=0 인 경우가 더 많이 이완되었다.
3. 하중비에 따른 잔류응력이 이완은 하중비가 -1에 가까울수록 이완량이 작았으며 0에 가까울수록 이완량이 증가하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부의 국가지정연구실사업 (NRL)의 일환으로 수행되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다

## 참고문헌

- (1) 심용래, 1997, 유한요소법을 이용한 용접부의 잔류응력, 변형 및 파괴해석, 대한용접학회지, 제15권, 제1호, pp.15~25(1)
- (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, 대한기계학회논문집 A권, 제23권 제9호, pp.1516~1524
- (5) 한승호, 신병천, 2002, "피로강도해석을 위한 용접잔류응력 이완의 정량적 평가" 2002, Vol. 26(10), pp 2018-2025
- (6) 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
- (7) Sindo Kou, 1987, Welding Metallurgy, John Wiley & Sons
- (8) 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
- (9) K. Lida, S. Yamamoto, 1997 "Residual stress relaxation by reversed loading", Welding in the world, Vol. 39, No.3, pp. 138-144
- (10) Wyman Z. Zhuang, 2001, "Investigation of residual stress relaxation under cyclic load", International Journal of fatigue 23, pp 31- 37