

용접시편 변형률 및 잔류응력의 유한요소해석

Finite Element Analysis of Strain and Residual Stress in Weld Specimen

양승용¹ · 구병춘¹ · 정흥채²

Seung-Yong Yang · Byeong-Choon Goo · Heungchai Chung

Abstract

This paper consists of two parts. One is finite element analysis of the redistribution of residual stresses of weld specimen by cutting. This work is necessary to predict the actual residual stress distribution of weld specimens used in fatigue test. The other subject is to calculate the relaxation of residual stress and the strain field induced by cyclic loading. To obtain fatigue life of weldment, the value of strain amplitude at each position is necessary, for example in the strain-life approach, and the numerical results can be used to verify experimental strain measurements. Thermo mechanical finite element analyses were conducted on the commercial package ABAQUS.

Keywords : Residual stress(잔류응력), Welding(용접), Cutting(절단), Finite element analysis(유한요소해석)

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[1].

이러한 용접물의 피로수명을 예측하기 위하여 크게 실험적인 방법과 유한요소해석이 이용되고 있다. 실험적인 방법에서는 용접 부재 또는 시편에 반복하중을 가하여 파괴에 이르렀을 때의 반복하중 수를 구함으로써 ϵ -N 또는 S-N 선도를 작성한다. 한편 유한요소해석을 이용하면 용접부의 응력 상태를 예측할 수 있고 하중에 의해 발생하는 변형률을 계산할 수 있으므로 이러한 값들을 SWT식[2] 등의 수명예측식에 대입함으로써 해당 영역의 피로수명을 예측할 수 있다.

용접에 의해 발생된 잔류응력이 구조물 피로수명에 미치

는 영향을 연구하기 위하여 보통 용접시편을 제작하여 피로시험을 수행하게 된다. 그러나 절단과정 동안 새로운 자유표면이 발생하게 되고 구조물 내의 잔류응력은 변화하게 되므로[3] 피로수명의 정확한 예측을 위해서는 시편 절단 전후의 잔류응력의 변화 특성을 알아보는 것이 필요하다. 본 논문에서는 용접부를 유한요소법으로 모델링하여 잔류응력분포를 예측하고 절단 시 잔류응력 재분포 특성을 파악하였다. 또한 용접시편을 피로시험에 활용하기 위한 준비 연구의 일환으로서, 반복하중이 가해질 경우 용접시편에 발생하는 응력 및 변형률의 진폭을 계산하였고 반복하중에 의한 잔류응력의 이완을 해석하였다. 즉 피로시험 중에 용접시편의 변형률을 스트레인게이지 등을 이용하여 측정하게 되는데 이러한 실험결과와 검증에 위하여 유한요소해석을 이용하여 시편에 발생하는 응력 및 변형률을 계산하였다. 또한 피로강도에 크게 영향을 미치는 잔류응력의 제거를 위해 이용되고 있는 기계적 응력 완화법에 의한 잔류응력 및 변형률의 이완을 해석하였다. 본 연구의 계산은 상용 유한요소해석 프로그램 ABAQUS를 이용하였다.

2. 용접부 절단의 유한요소해석

2.1 용접과정 열전달 해석

용접부 피로거동 실험을 위한 시편 제작은 Fig. 1에 보는

1 정회원, 한국철도기술연구원, 선임연구원

2 정회원, 한국철도기술연구원, 책임연구원

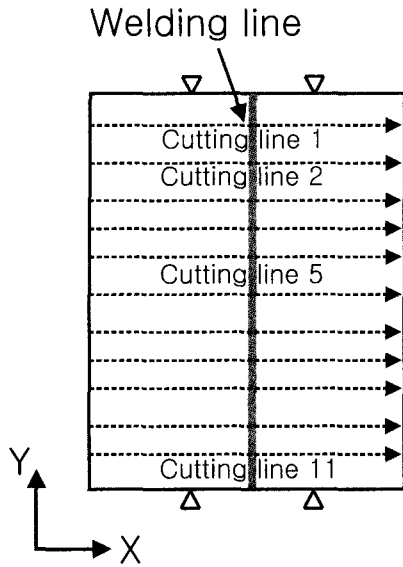


Fig. 1. Welding proceeds downward along the welding line and the cutting goes from left to right. After cutting is completed, the plate is separated into 12 pieces

바와 같이 두개의 100mm×370mm 크기의 평판을 맞대기 용접한 후 cutting line 1, ..., 11을 따라 12개의 시편으로 절단하는 과정을 거치게 된다. 유한요소해석을 이용하여 시편 내의 잔류응력 분포를 예측하기 위해서는 먼저 용접에 의한 열전달 해석을 수행하여야 하며 이렇게 구한 온도분포를 이용하여 열응력 해석을 하고, 그 후 시편 제작을 위한 절단 과정 시뮬레이션을 하게 된다. 본 절에서는 용접 열전달 해석에 대하여 기술하고자 한다.

용접 열전달 해석은 대개 2차원 또는 3차원 해석에서 유한요소 생성 기법을 이용하여 용융되어 유입되는 용입재를 모델링 하게 되고, 아크에 의한 열유입을 고려하게 된다[4,5]. 본 논문에서는 해석 대상을 2차원 문제로 간주하였으며, Table 1에 용접 열전달 해석에 사용된 파라미터 값을 정리하

Table 1. Numerical parameter values

대기온도	20 ℃
Filler metal 온도	2000 ℃
Solidus 온도	1465 ℃
Liquidus 온도	1544 ℃
용융잠열 [6]	247000 J/kg
Arc 효율 η_a [6]	0.4
전압 V	105 V
전류 I	150~190 A
Arc beam radius r_b	0.005m
대류열전달 계수	10 J/($sm^2 \text{ }^\circ\text{C}$)

였다. 공기의 대류열전도 계수는 10~100J/($sm^2 \text{ }^\circ\text{C}$)임을 이용하였다.

대상으로 한 용접방법은 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 이고, 사용된 소재는 용접구조용 압연 강재(SWS490A, carbon 0.2 max wt. %)이다. 아크에 의한 열유속을 아래의 식

$$q_0 = \frac{\eta_a VI}{\pi r_b^2} \cdot 3$$

$$q = q_0 e^{-3\left(\frac{r}{r_b}\right)^2}$$

을 이용하여 계산하면 $q_0 \approx 260 \times 10^6$ (J/m²s) 이다. 위 식의 Gaussian 열분포를 고려한 지수항의 값을 0.5로 가정하고, 단위두께에 대한 열유입량 bf를 계산하면 $bf = 130 \times 10^6$ (J/m³s)이다. 따라서 실제 두께 10mm 평판의 용접에 대한 2차원 해석을 수행하기 위해서 $bf = 130 \times 10^8$ (J/m³s)를 체적 열유입량으로 부가하였다. 용융상태로 용접봉으로부터 유입되는 용입 금속에 의한 열유입은 요소생성법을 이용하여 초기온도 2000 ℃인 유한요소가 6mm/s의 속도로 움직이는 용접봉(열원)을 따라 생성되도록 하였으며, 4개의 바깥 경계선을 따라 대기와의 대류열전달 경계조건을 적용하였다.

Fig. 2는 온도변화에 따른 밀도, conductivity, specific heat 의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 3은 Fe-C 평형상태도를 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 약 727 ℃ 근처에서 페라이트(BCC iron)-오스테나이트(FCC iron) 상변화에 따라 비열이 매우 큰 값을 가지게 된다. 1500 ℃ 근처에서도 고상-액상 상변화에 따른 비열의 급격한 증가가 예상되지만 본 논문에서는 고려하지 않았다. 한편 고상-액상 상변화에 따른 열전도율의 급격한 변화와 용융 잠열은 고려에 포함시켰다. Fig. 4는 용접과정 중의 온도분포를 보여준다. 용접 중심부에서의 최고 온도는 대략 2600 ℃로 계산되었다.

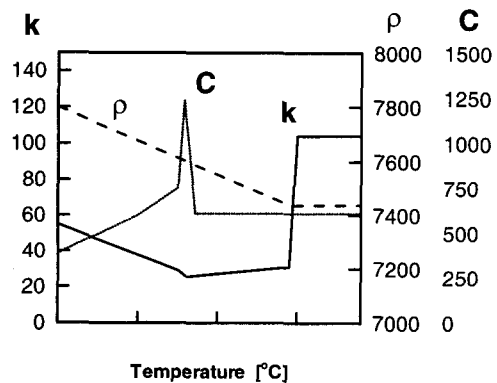


Fig. 2. Variation of conductivity k, density ρ and specific heat C with temperature

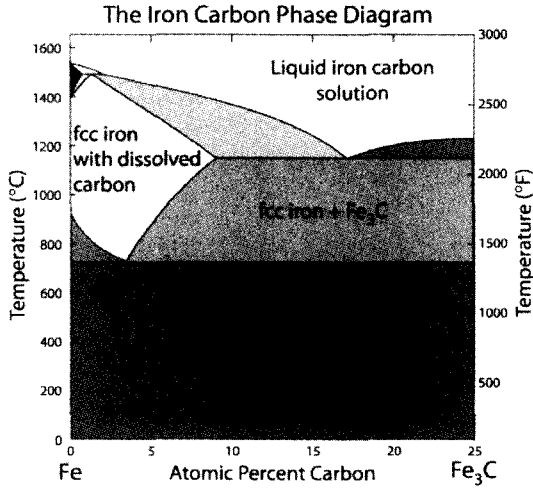


Fig. 3. Fe-C phase diagram. 25 at. % of carbon corresponds to 7 wt. % approximately.

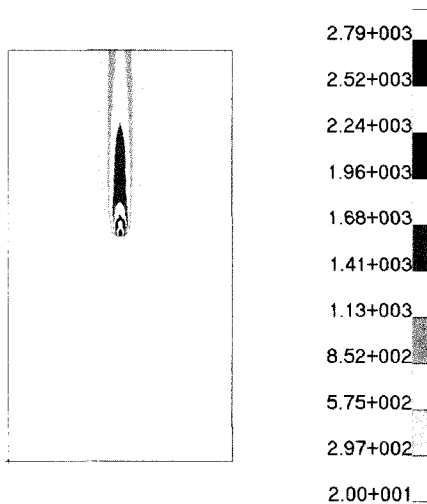


Fig. 4. Temperature distribution at a time during the welding. The unit of temperature is $^{\circ}\text{C}$.

2.2 용접과정 열응력 및 절단 해석

용접 열전달 해석으로부터 구해진 용접과정 동안의 온도 분포를 이용하여 단위두께에 대하여 2차원 plane stress 열응력 해석을 수행함으로써 잔류응력 분포를 계산하였다. 탄소성 거동을 가정하였고, 고온에 의한 탄성계수 및 소성경화율의 둔화를 고려에 포함시켰다. Fig. 5는 온도변화에 따른 Young's modulus와 Poisson's ratio를 나타낸다. Fig. 6은 온도에 따른 항복응력-소성변형률 곡선을 나타낸다. 한편 고온에서의 금속의 풀림 현상은 고려에서 제외하였다. 용접과정 동안은 두 판재를 가용접 하여 고정시키고 용접하게 되는데 경계조건으로 판재 상단 및 하단에 두 군데씩 변위 경계조건을 주어 가용접 조건을 해석에 반영하였고,

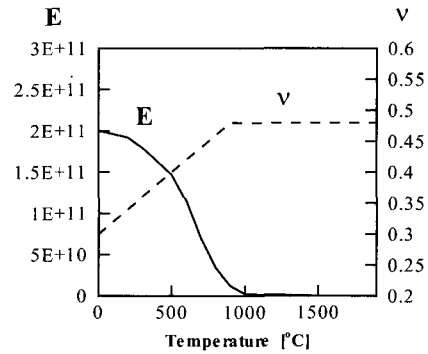


Fig. 5. Variation of Young's modulus E and Poisson's ratio ν with temperature

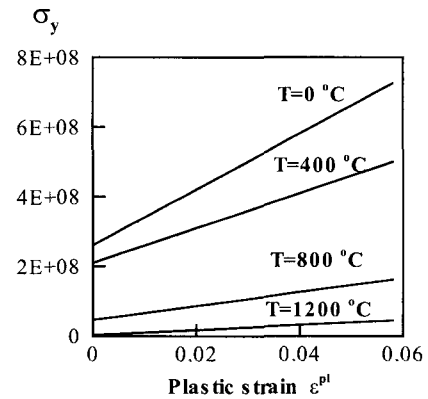
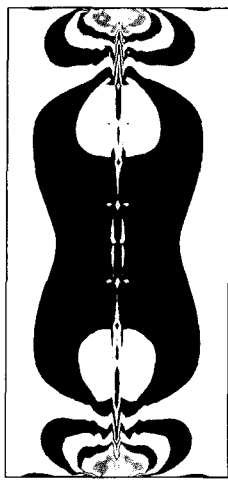


Fig. 6. Yielding stress and plastic strain curves at several temperatures

용접공정을 끝마친 후에는 가용접 경계조건을 제거 하였다 (Fig. 1 참조).

용접 열응력 해석을 마친 후 절단 해석은 요소 소멸을 이용하여 자유표면의 생성을 시뮬레이션 하였고 절단 공구와의 마찰에 의한 소성변형은 무시하였다. ABAQUS 는 두 면의 분리를 모의하기 위하여 요소소멸 및 debond 등의 기능을 제공하고 있으나, debond 기능은 3차원 문제에는 적용할 수 없으며 접촉하고 있는 두면을 정의하여 주어야 하는 등 모델링 관점에서 요소소멸법 보다는 복잡한 면이 있어, 본 논문에서는 요소소멸법을 이용하여 절단(자유표면의 생성)을 시뮬레이션 하였고, Fig. 1에서 보는 바와 같이 절단선 1, ..., 11의 순서로 부재를 절단하였다.

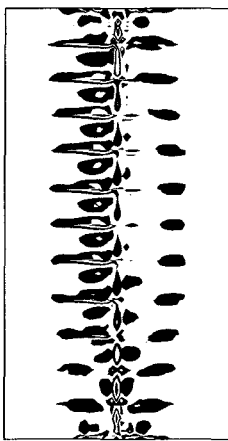
Fig. 7(a)-(f)는 용접공정을 마친 후와 용접된 부재가 절단선 5 및 절단선 11을 따라 절단 된 후의 잔류응력 분포를 보여준다. Fig. 8은 Fig. 7에서 용접선 상의 잔류응력 분포를 절단공정을 따라 가며 그린 그림으로서, 절단공정 중의 잔류응력 변화를 확인할 수 있다. 수평방향 잔류응력(σ₁₁)의 최대값은 절단에 의해 크게 변화 하지 않지만, 수직 방향 응



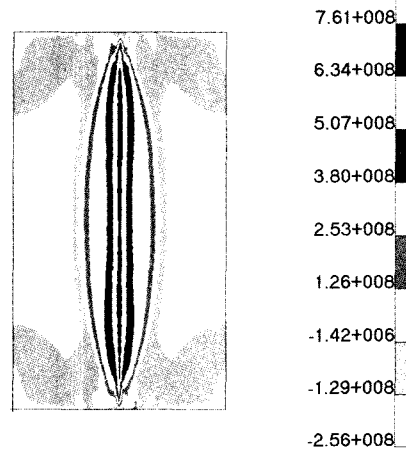
(a) $\sigma_{11}(=\sigma_{xx})$ distribution after welding is completed



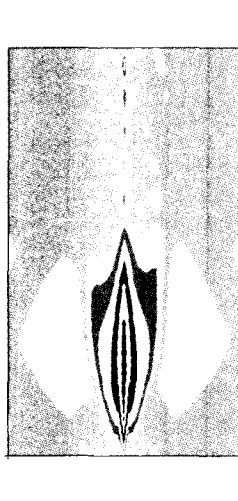
(b) σ_{11} distribution after cutting along the line 5



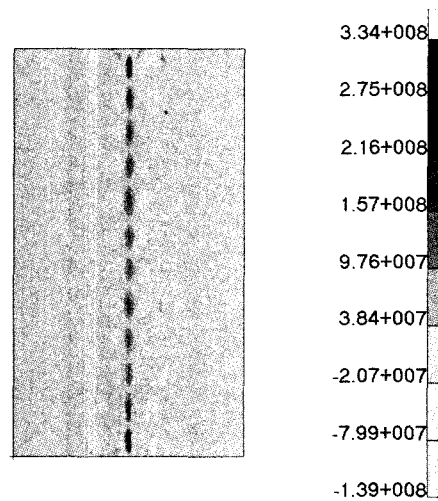
(c) σ_{11} distribution after cutting along the line 11



(d) σ_{22} distribution after welding is completed. The unit of stress is Pascal

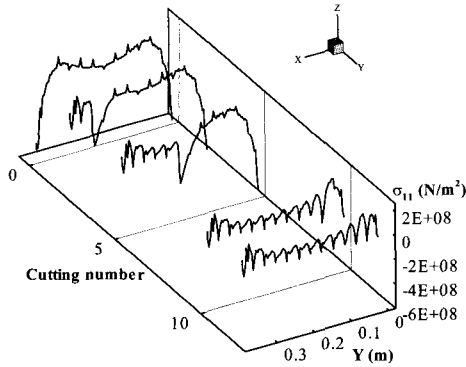


(e) σ_{22} distribution after cutting along the line 5

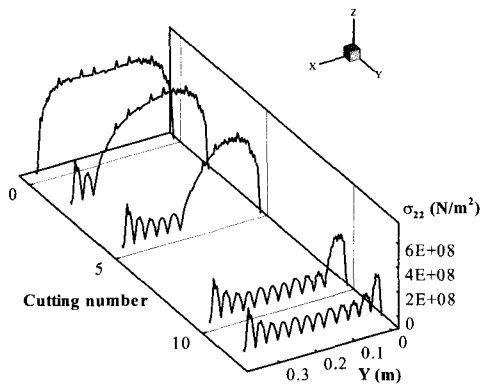


(f) σ_{22} distribution after cutting along the line 11

Fig. 7. Residual stress distributions after welding and cutting. Distributions are plotted on the undeformed configuration



(a) Change of σ_{11} distribution during cutting procedure



(b) Change of σ_{22} distribution during cutting procedure

Fig. 8. Change of residual stress distributions along the welding line at the center (Fig 1) during cutting procedure. Stresses are plotted when welding is completed (cutting number is 0) and after cutting along lines 2, 5, 10 and 11

력(σ_{22})은 큰 폭으로 이완됨을 알 수 있었다. 또한 수평방향 응력과 관련하여, 절단 전에 부재 중앙 부위에서 잔류응력은 양수이지만, 절단공정이 끝난 후에는 자유표면 근방에서 음수로 바뀔 수 있었다.

3. 용접시편 반복하중에 의한 변형 및 잔류응력 이완

용접부의 피로수명을 연구하기 위하여 보통 용접시편에 반복하중을 가하여 피로시험을 하게 된다. 이동형 등[2]은 유한요소해석을 이용하여 반복하중을 받는 용접시편의 변형률과 잔류응력 분포를 구한 후 SWT 또는 Manson 등에 의해 제안된 수명에측식을 이용하여 용접시편의 피로수명을 계산하였다. 본 장에서는 간단한 형상의 2차원 평면변형률 조건인 용접시편에 대하여 반복하중을 가하였을 때 잔류응력 및 변형률의 변화를 유한요소해석을 이용하여 알아보았다. 재료의 물성치는 앞 장의 용접 및 절단 해석의 값들과

동일한 값을 이용하였다. 본 연구는 용접시편의 반복하중 시험에 의해 시편의 변형률 및 응력을 실제 측정할 때, 그 실험 결과의 예측 및 검증을 위한 기초 연구라 할 수 있다. 변형률은 응력에 비하여 시편 전체 구간에 걸친 측정(full field measurement)이 용이하므로 변형률의 유한요소해석 결과는 실험 결과와의 비교를 위하여 특히 유용하다고 할 수 있다.

Fig. 9~10은 200mm×25mm 크기 용접시편에 최대값 500 MPa, R=0의 반복된 인장하중을 양 끝에 주었을 때, 첫 번째 사이클 전 후의 잔류응력 분포를 나타낸 그림이다. 용접부(시편 중앙)에 분포한 σ_{11} 및 σ_{22} 의 값은 한 사이클 하중 부가 및 제하) 후에 큰 폭으로 이완됨을 관찰할 수 있다. 가해진 최대하중이 시편의 항복강도(대략 300 MPa, Fig. 6 참조) 보다 크므로 시편은 첫 번째 사이클에서 소성변형을 하게 되고 잔류응력은 거의 사라지게 된다.

Fig. 11~12는 ϵ_{11} 및 ϵ_{22} 의 값을 첫 번째 사이클 전 후에 대하여 나타낸 것이다. ϵ_{11} 의 값은 용접부 이외의 부분에서 소성변형에 의해 큰 폭으로 증가하여 잔류변형률로 남음을 볼

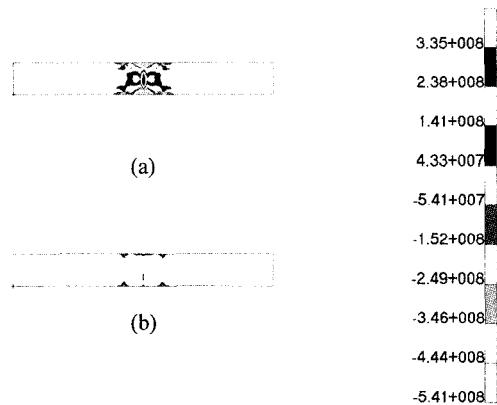


Fig. 9. Residual stress σ_{11} distributions before (a) and after (b) cyclic loading of 500 MPa

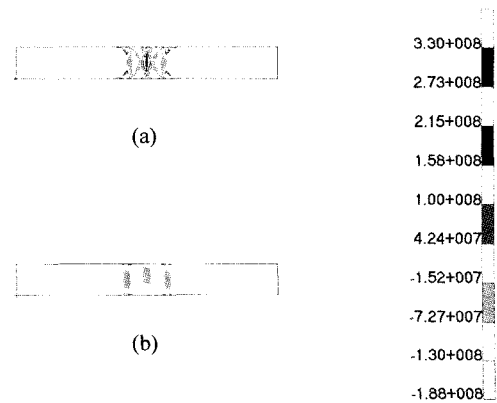


Fig. 10. Residual stress σ_{22} distributions before (a) and after (b) cyclic loading of 500 MPa

수 있고, 용접부에서의 변형률 은 다음의 Fig. 13~14에서 보는 바와 같이 대략적으로 평균 0.01 정도 이완되게 된다. Fig. 13~16은 시편 중앙에서 y축 방향으로 위치한 용접선을

을 따라 변형률 및 잔류응력의 값을 각 사이클이 종료된 시점(최소하중 상태)에서 구한 결과이다. 그림으로부터 사이클(그래프 상에서 시간에 해당) 수에 따른 잔류응력 및 변형

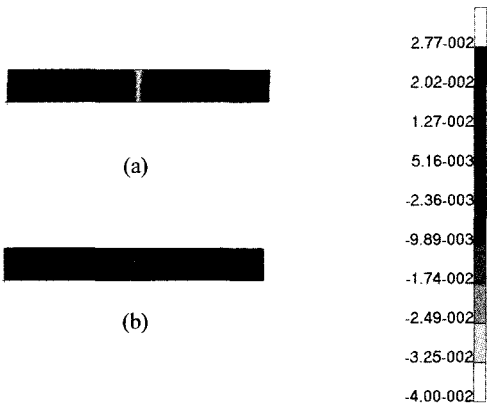


Fig. 11. ϵ_{11} distributions before (a) and after (b) cyclic loading of 500 MPa

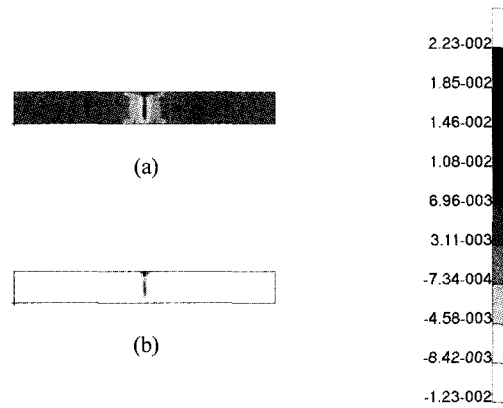


Fig. 12. ϵ_{22} distributions before (a) and after (b) cyclic loading of 500 MPa

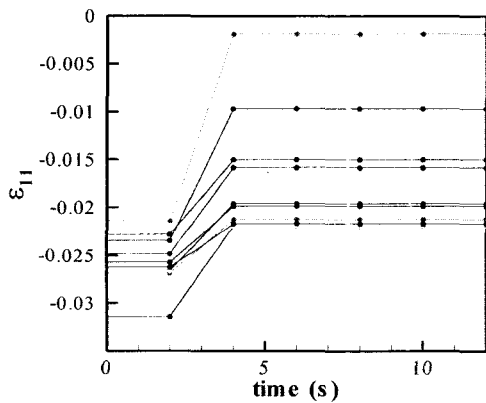


Fig. 13. Relaxation of ϵ_{11} with cyclic loading of 500 MPa. 2 second corresponds to 1 cycle and the first cycle exists between 2 and 4 seconds

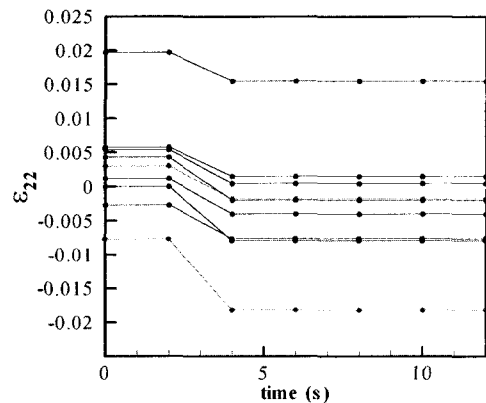


Fig. 14. Relaxation of ϵ_{22} with cyclic loading of 500 MPa. 2 second corresponds to 1 cycle and the first cycle exists between 2 and 4 seconds

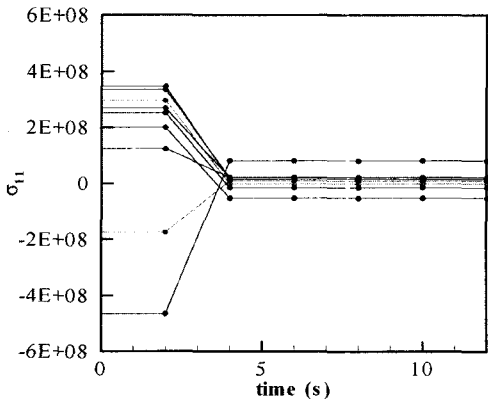


Fig. 15. Relaxation of σ_{11} with cyclic loading of 500 MPa. Stress is almost completely removed at 4 seconds when the first cycle is finished

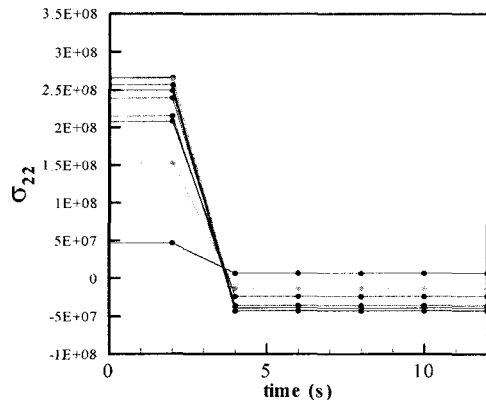


Fig. 16. Relaxation of σ_{22} with cyclic loading of 500 MPa

률의 변화를 관찰할 수 있다. 그림에서 볼 수 있듯이 잔류응력 및 변형률은 첫번째 사이클에서 변화한 후 그 이후 4 사이클에서는 거의 변화하지 않음을 알 수 있고, 잔류응력은 첫번째 사이클에서 거의 완전히 이완됨을 볼 수 있다.

Fig. 17~18은 최대하중이 100 MPa일 경우의 잔류응력의 변화를 시간에 따라 도시한 것이다. 이 경우 시편에 가해진 최대하중이 재료의 항복강도 보다 낮으며, 시편은 반복하중에 의해 탄성거동을 하고 용접에 의해 발생된 잔류응력은 반복하중에 의해 거의 변화하지 않음을 볼 수 있다. 만약 잔류응력 이완을 목적으로 이러한 외력을 가하였다면 이 경우는 잔류응력 이완 효과가 거의 없음을 알 수 있다.

Fig. 19~20은 반복하중 과정 중의 변형률의 변동 폭을 조사하기 위하여 최대하중 100 MPa와 500 MPa의 두 가지 경우에 대하여 사이클의 최대하중 및 최소하중 시점에서 용접선에서의 변형률 성분 들을 그린 것이다. 최대하중이 100 MPa 일 경우 변형률의 변동폭은 탄성 성분만으로 이루어져 있으며, 500 MPa일 경우 변형률의 변동폭은 첫번째 사이클

에서 탄성변형률과 소성변형률의 합이며 그 이후는 탄성변형률로만 이루어져있다. 변형률의 변동폭은 용접시편의 피로수명을 예측하기 위하여 필요한 중요한 측정값 중의 하나이다.

4. 결론

용접 및 절단 공정과 반복하중에 의한 용접시편의 변형률 및 잔류응력의 변화를 2차원 유한요소해석을 이용하여 해석하였으며, 해석 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 용접선 방향의 잔류응력 최대값은 용접선에 수직한 방향으로의 절단에 의하여 큰 폭으로 감소하였다. 용접선 방향에 수직한 방향으로의 잔류응력 분포는 절단에 의해 그 최대값이 크게 변화하지 않았으며, 인장 잔류응력을 나타내던 부위가 압축 잔류응력으로 전환되는 현상

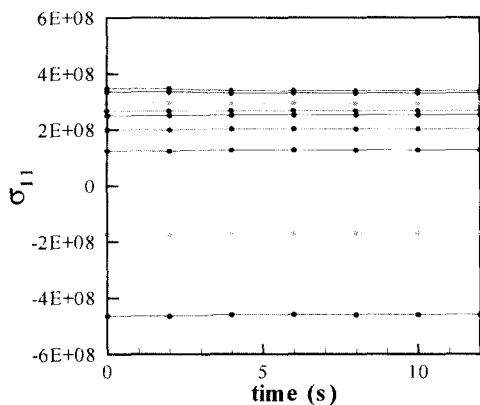


Fig. 17. Change of σ_{11} with cyclic loading of 100 MPa. In this case, residual stress relaxation is not large

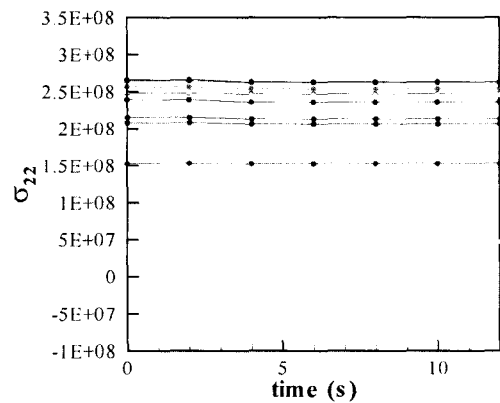


Fig. 18. Change of σ_{22} with cyclic loading of 100 MPa. In this case, residual stress relaxation is not large

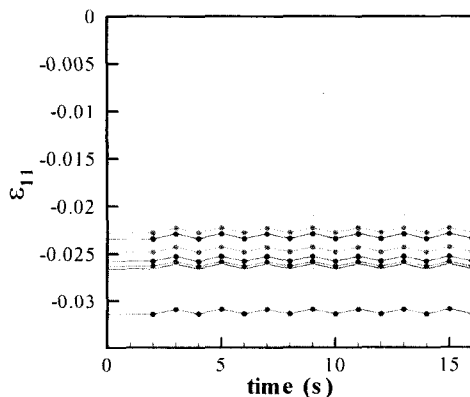


Fig. 19. Change of ϵ_{11} with cyclic loading of 100 MPa

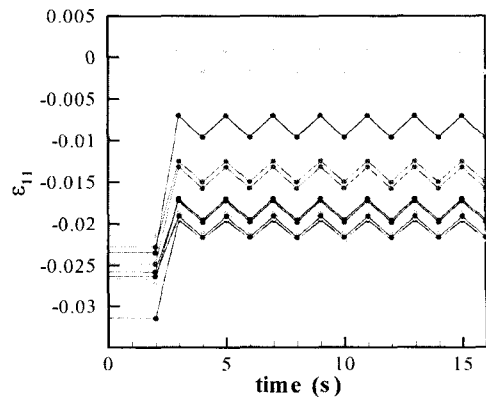


Fig. 20. Change of ϵ_{11} with cyclic loading of 500 MPa

이 나타났다.

- (2) 용접시편에 가해진 반복하중이 재료의 항복강도 보다 클 때, 용접잔류응력의 대부분이 첫번째 사이클에서 이완되었다. 반복하중이 항복강도 보다 작을 경우, 현재의 해석모델에서는 잔류응력의 이완이 관찰되지 않았다.
- (3) 용접시편에 가해진 반복하중이 재료의 항복강도 보다 클 때, 용접부의 변형률은 첫번째 사이클에서 이완되며, 용접부 이외 영역에서는 소성변형에 의해 잔류변형률이 발생하였다.

후 기

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



1. Stephens, R. I., Fatemi, A., Stephens, R. R., Fuchs, H. O., 2001. Metal fatigue in engineering. John Wiley & Sons, Inc.
2. 이동형, 서정원, 구병준, 석창성, 2003. 용접후열처리가 피로수명에 미치는 영향. 대한금속재료학회 재료강도심포지움.
3. Ohta, A., Sasaki, E., Nihei, M., Kosuge, M., Kanao, M., and Inagaki, M., 1982. Fatigue crack propagation rates and threshold stress intensity factors for welded joints of HT80 steel at several stress ratios. Int. J. Fatigue, pp.233-237.
4. 서정원, 구병준, 이동형, 정홍재, 2003. 용접부 잔류응력의 이완에 관한 해석. 대한기계학회 2003년도 춘계학술대회.
5. 이동형, 구병준, 2002. 용접부의 균열진전에 따른 잔류응력 재분포 해석. 한국철도학회 2002년도 추계학술대회.
6. 김지훈, 2000. 3차원 열탄소성해석에 의한 GMAW 시뮬레이션. 서울대학교 석사학위논문.