

반복 하중을 받는 용접 구조물의 잔류 응력 저감 파악을 위한 유한요소 해석 및 실험적 연구

양용식¹·강중규²·이장현^{1,†}·김성찬³·황세윤¹
인하대학교 조선해양공학과¹
대우조선해양 구조R&D²
인하공업전문대학 선박해양시스템과³

Experiments and Finite Element Analysis for the Estimation of Stress Relief in Welded Structures

Yong-Sic Yang¹·Joong-Kyoo Kang²·Jang-Hyun Lee^{1,†}·Sung-Chan Kim³·Se-Yum Hwang¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University¹
Daewoo Shipbuilding & Marine Engineering Co., Ltd., Ship and Marine Structure R&D Team²
Department of Ship Structure and Ocean System, Inha Technical College³

Abstract

Welding inevitably introduces the residual stresses which affect the fatigue strength of the joint structure. The mitigation of fatigue strength depends on the residual stress magnitude and distribution. Stress relief analyses are of practical interest for all cyclic loaded welded structures, such as ships and offshore structures. In order to estimate the effects of relaxation of residual stresses in the welded structure, this paper presents a finite element analysis procedure and experimental results for the welded structure. Cruciform specimens joint by MAG welding have been tested to measure the released stress. Relieved welding residual stresses obtained by finite element analysis are compared with those measured by experiment.

Keywords : Mechanical stress relief(기계적 응력 저감), Welding residual stress(용접잔류응력), Finite element analysis(유한요소해석), Cyclic load(반복하중)

1. 서론

용접에 의한 고온 열 이력은 구조물에 잔류응력을 유발시키며, 인장 잔류응력은 구조물의 피로강도를 저하시키는 요인이다(Kim, et al., 2008a, b). 용접잔류응력과 피로수명의 관계는 복잡한 관계를 가지고 있으나, 일반적으로 초기 잔류응력이 인장 성분일 경우에는 피로강도를 감소시키는 것은 주지의 사실이다(Do, et al., 2009; Lee, et al., 2002). 이러한 이유로 초기 용접 잔류응력을 피로수명 평가에 고려하는 방법으로는 평균 응력법 등이 사용되고 있다(Han, et al., 2002).

그러나 용접잔류응력은 구조물의 사용기간 동안 일정한 값이 유지되는 것이 아니고, 외력의 크기 및 반복 횟수에 따라 완화되거나 재 분포된다는 것은 자명하다(Nitschke-Pagel & Dilger, 2009). 특히 경우에 따라서 첫 번째 하중에서 잔류 응력의 대부분이 완화될 수 있다는 결과도 찾아 볼 수 있다(Zhuang & Halford, 2001). 따라서 용접잔류 응력의 풀림 효과를 피로수명 평가에 반영하지 않는다면 오히려 피로수명이 과소평가되는

문제점이 발생한다. 따라서 용접잔류응력의 완화 정도는 피로수명 평가 과정에서 중요한 역할을 하며, 완화 정도를 어떻게 평가하는가에 따라서 피로수명의 정도와 신뢰도가 달라진다(Han, et al., 2002). Smith, et al. (2001)은 multi-linear kinematic hardening을 적용하여 용접잔류응력의 완화 기구를 유한요소해석 및 실험을 통하여 제시하였으나, 하중 반복수가 증가함에 따라 해석의 정확성이 많이 떨어짐을 확인하였으며, 해석에 의한 응력 완화 예측이 어려운 문제임을 밝혔다.

본 연구는 반복적 하중에 의하여 완화되는 용접잔류응력의 특성을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 실제 구조물의 응력 저감 정도를 파악하기 위한 기초 연구로서 십자형 시편을 대상으로 응력 저감의 수치적인 모델과 예측된 응력 결과를 제시하고자 한다. 외력에 의한 용접잔류응력의 완화는 MSR(Mechanical Stress Relief) 현상의 일종으로 볼 수 있다. 반복 하중에 의한 MSR의 정도를 파악하기 위해서는 (1) 초기 용접잔류 응력 분포, (2) 반복 하중의 크기, (3) 반복 하중의 수, (4) 재료의 가공 경화 또는 가공 연화 특성을 반영하여야 한다. 이를 위하여 유한요소해석법을

이용하여 용접잔류응력을 계산하였으며, 초기 잔류응력과 반복 하중을 고려하여 저감되는 응력의 수준을 계산하였다. 또한 시편에 존재하는 초기 용접잔류응력 및 반복 하중을 가한 뒤 잔류응력을 계측하여 그 결과를 제시하였다. 이를 바탕으로 용접잔류응력의 저감 정도를 비교 분석하였다.

2. 응력완화 실험의 조건

2.1 시편 특성 및 실험 조건

사용한 시편은 십자형 형상의 필렛 용접 구조물이다. 사용된 재료는 AH36 강재이며, 시험 편은 Fig. 1과 같이 850mm의 길이와 115mm의 폭을 가지고 있다. 수직판과 수평판의 접합에는 MAG(Metal Active Gas) 용접법을 이용하였으며, 사용된 용접 조건은 Table 1에 정리하였다.

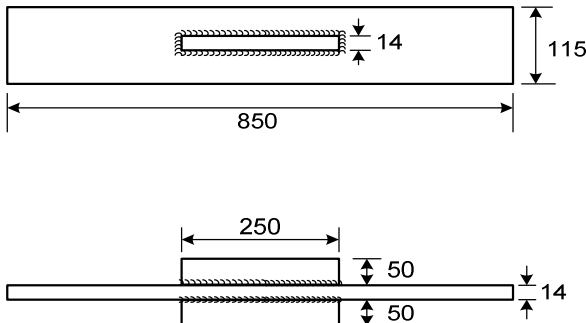


Fig. 1 Geometric configuration of cruciform specimen

Table 1 Welding condition

Mode	Current I [A]	Voltage V [V]	Speed [mm/sec]
MAG	200	28	5.05

시편에 각각 200MPa와 90MPa의 반복 압축 및 인장 하중을 적용하였다. 하중 조건은 Table 2에 정리하였다. 인장시험기에 시편을 설치하고 하중을 시편의 길이 방향으로 가하고, 10 사이클이 가해진 후에 잔류응력을 계측하였다.

Table 2 Loading condition for experiments

Case	Cycles	Loading Magnitude	Nominal stress range
1	10	Compression 200MPa	R=-∞
2	10	Tension, 200MPa	R=0.1
3	10	Compression 90MPa	R=-∞
4	10	Tension, 90MPa	R=0.1

2.2 잔류 응력 계측 방법

잔류응력은 비파괴 방법인 Ultrasonic 방법을 이용하였으며, As-Weld 상태 및 반복 하중을 가한 후에 표면에서 잔류 응력을 계측하였다. 용융부 끝 부분에서 10mm 위치에서 120mm 구간을 걸쳐 12개의 점에 초음파 게이지(Ultrasonic gauge)가 부착되었다. 반복 하중이 가해진 시편의 weld toe 부분에서부터 2~3mm 떨어진 위치에서의 잔류응력 변동이 계측되었다.

3. 유한요소 해석 모델

잔류응력을 예측하기 위해서 3차원 열탄소성 해석을 수행하였으며, 반복 하중에 따른 응력 변화는 용접 해석 모델의 경계 조건을 변경함으로써 해석하였다. 해석에는 상용 유한요소 해석 코드인 MSC.Marc Mentat (MSC Software Co. Ltd. 2007)를 이용하였다.

3.1 용접잔류응력 해석 모델

용접에 따른 온도 분포 해석은 열 확산 방정식을 적용하였다. 용접 비드의 생성 과정은 요소 제거 및 생성 기법 (Element Kill and Alive)을 적용함으로써 요소 생성에 따른 강성의 변화를 반영하였다. 재료의 온도 의존성에 따른 비선형 문제의 해석에는 Newton-Raphson 방법을 사용했다(Hwang, et al., 2010(a)).

또한 해석 시간을 단축하기 위하여 용접부는 세밀한 요소를 사용하고 용접부에서 멀어질수록 요소의 크기를 증가시켜 요소 및 절점의 개수를 줄였다. 수직판은 길이 850mm, 폭 115mm, 두께 7.5mm이며, 수직판은 250mm, 50mm, 15mm이다. 사용된 요소는 8절점 Iso-parametric hexahedron이며, 요소는 11,616개, 절점은 15,229개를 이용하였다.

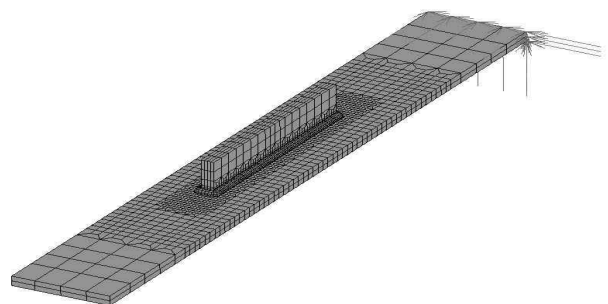


Fig. 2 Finite element meshes and constraint condition for welding analysis

용접에 따라 가해지는 열원은 용접봉과 모재 사이에 발생하는 Arc의 열속(heat flux)과 용융된 용입재가 가진 초기 온도의 열에너지로 구분할 수 있으나, 본 해석에서는 열속의 분포를 조정함으로써 용입재가 가진 초기 열에너지를 동시에 고려하였다(Lee, et al., 2007).

아크에 의한 열속은 Goldak, et al. (1984)에 의해 제시되고 Nguyen, et al. (1999)에 의해 검증된 Double Ellipsoidal heat source 모델을 적용하였으며, 열속($q_{f,r}(x,y,z)$)의 분포는 다음과 같다.

$$q_{f,r}(x,y,z) = \frac{6\sqrt{3}f_{f,r}Q}{abc_{f,r}\pi\sqrt{\pi}} e^{-\frac{3x^2}{a^2}} e^{-\frac{3y^2}{b^2}} e^{-\frac{3z^2}{c^2}} \quad (1)$$

$$Q = \eta VI \quad (2)$$

여기서, Q 와 η 는 각각 heat power와 용접 아크 효율을 의미한다. a, b, c_f, c_r 는 Fig. 3에 보인 것과 같이 열속의 폭, 깊이, 전방 및 후방부 길이를 의미한다. f_r, f_f 은 각각 열속의 전방 후방 분배 비율을 의미한다(Hwang, et al., 2010(b)). 열속의 크기는 a, b, c_f, c_r 값을 통해 조정하였다. Fig. 4는 실제 해석에 적용되었던 비드(bead)에 가해진 열속의 형상을 보여주고 있다.

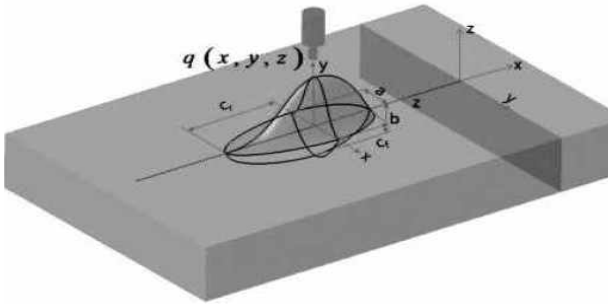


Fig. 3 Double ellipsoidal heat source configuration (Goldak, et al., 1984)

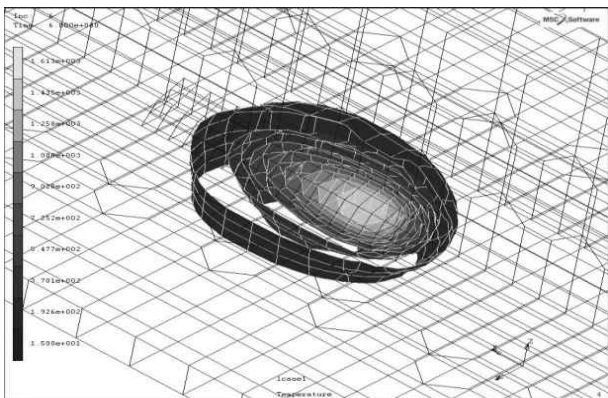


Fig. 4 Profile of heat flux applied to the bead

용접 진행단계와 냉각 단계에서 자연 대류 상태를 반영하였으며, 기준 온도는 15°C, 대류계수(h)는 Rykalin(1974)이 제안한 용접 시의 대류계수를 적용하였으며, 식 (3)과 같다.

$$h = 24.1 \times 10^{-4} \epsilon^r T^{1.41} \quad (3)$$

T 는 각 대류 조건이 부여되는 영역의 온도이며, 방사율(ϵ^r)은 0.9로 가정하였으며, 용접 과정 및 용접 후에 자연 대류 경계 조건은 Table 3에 정리하였다.

Table 3 Boundary conditions for convective heat transfer

Room Temp.	Step	Convection Time	Applied Area
15°C	Welding	Welding time	All surfaces except weldment
15°C	Convection	1hour	All surface

3.2 반복 하중에 응력완화 해석 모델

응력완화 해석을 위해서는 이미 수행한 용접 해석 유한요소모델의 하중 및 구속 조건만 변경하였다. 즉, 응력완화 모델은 용접 잔류응력을 초기 조건으로 적용하고, 하중 경계조건을 추가함으로써 구현하였다. Table 2에 설명한 것과 같이 200MPa와 90MPa의 크기로 각각 인장과 압축 하중을 경계 조건으로 부가하였다. 시편의 한 쪽 끝을 고정시키고 다른 한 쪽에 하중을 가하는 방법으로서 경계 조건을 변경하였다. 반복 하중은 인장응력일 때와 압축응력일 때 각각 $R=0.1$ 과 $R=-\infty$ 를 적용하여 (20~200MPa), (-200~0MPa), (9~90MPa), (-90~0MPa)의 총 네 가지 경우의 결과를 확인하였다. Fig. 5와 Fig. 6은 각각 강제 구속 조건, 하중 조건을 보인 것이다.

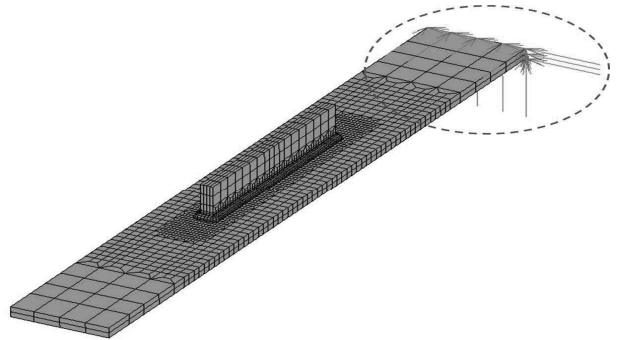


Fig. 5 Constraint condition for MSR simulation

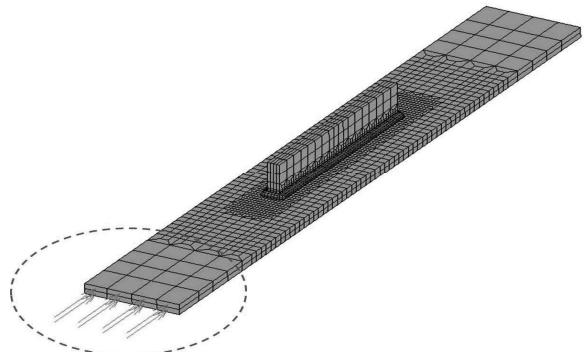


Fig. 6 Loading condition for MSR simulation

3.3 재료 물성치

사용된 강재는 AH36로 가정하였으며 재료의 열적 및 기계적 성질은 온도 변화에 따른 특성을 고려하였다. 다만, 밀도는 온도 변화에 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다. Fig. 7과 Fig. 8은 다른 재료 특성 곡선을 보인 것이다. 용접 단계에서의 재료의 가공 경화 현상을 모델링하기 위하여 Chang and Teng (2003)이 제시한 Multi-linear Isotropic hardening 계수를 근거로 가공경화 재료 특성을 반영하였다. AH36 재료의 응력-변형률 특성은 Fig. 9에 보인 것과 같은 값을 이용하였다. 용접 해석 단계에서는 일반적으로 등방 경화 모델 또는 이동 경화 모델이 사용되지만, 잔류 응력의 값에 미치는 영향은 적으므로 등방 경화 모델을 사용하였다.

그러나 응력 저감 해석 단계에서는 반복되는 외력에 의한 경화 특성은 반복 응력-변형률 모델을 이용하는 것이 적절하다. 특히 바우싱거 효과(Bauschinger Effect)로 대별되는 재료의 이동 경화(Kinematic hardening) 특징은 응력 저감의 일차적인 원인이라고 볼 수 있다(Zhuang & Halford, 2001; Webster & Ezeilo, 2001). Lee, et al.(2009)은 반복하중을 받는 AC4C-T6 알루미늄 합금강을 대상으로 가공경화 모델의 특성을 분석한 바 있다. 실험과 유한요소해석 결과를 비교함으로써 선형 경화 모델은 반복 하중을 받는 응력-변형률 관계를 표현하기 어려움을 확인하고, MSR, Shake down과 같은 반복 하중을 받는 재료의 가공 경화 특성은 등방 경화와 이동 경화가 동시에 고려된 복합 경화 모델이 적절함을 설명하였다. 따라서 본 연구는 기계적 응력 저감 해석에 필요한 재료 경화 특성은 복합 경화로 적용함으로써 등방 경화뿐만 아니라 이동 경화를 모두 고려하여 인장 및 압축 하중에 따른 재료 거동을 반영하였다. 물성치는 MSC.Marc에서 제공하는 복합 경화 모델을 선택하여 적용시켰다. Fig. 10은 해석에 적용된 복합 경화 모델을 설명한 것이다.

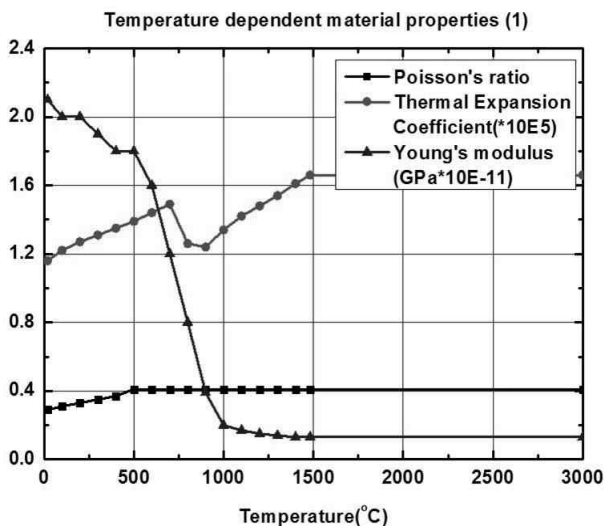


Fig. 7 Temperature dependent mechanical material properties

또한, 재료의 항복조건은 Von-Mises의 법칙을 따르고 흐름 법칙(Flow rule)이 적용되도록 선택하였으며, 비선형 해석 기법으로는 Newton Rhapson 방법을 사용하였다.

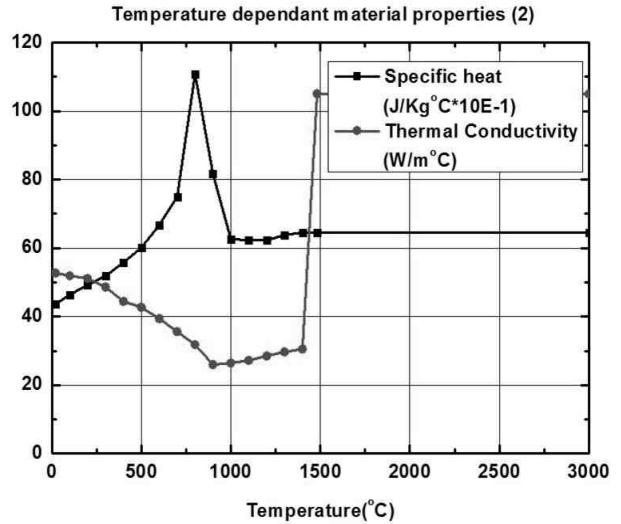


Fig. 8 Temperature dependent thermal material properties

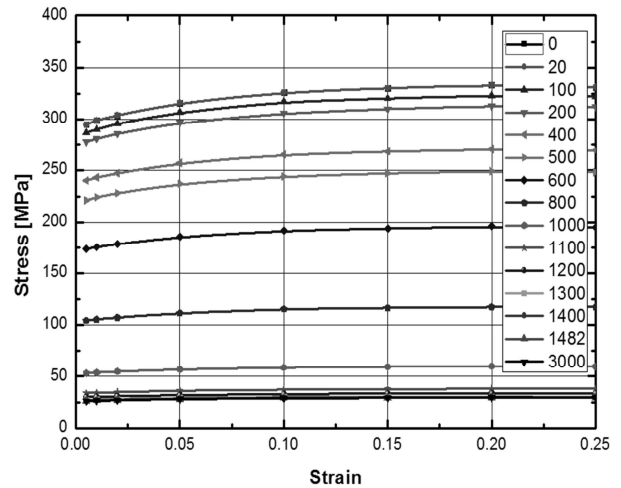


Fig. 9 Stress and plastic strain relationship

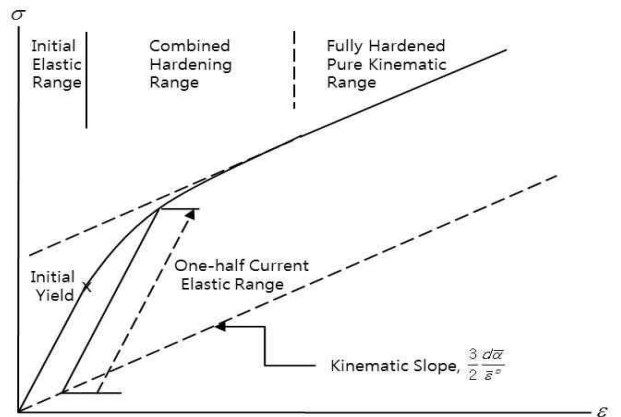


Fig. 10 Uniaxial tension behavior of the combined hardening model (MSC Software Co. Ltd. 2007)

4. 실험 및 해석 결과

4.1 잔류응력 계측 결과

시편의 용접 용융부 끝에서 10mm 떨어진 부분에서부터 1) 길이 방향으로 108mm 지점 잔류응력 분포와 2) 폭 방향으로 100mm를 각각 12개의 점, 17개의 점에서 측정하였다. 잔류 응력 측정 위치는 Fig. 11에 간략하게 표시하였다.

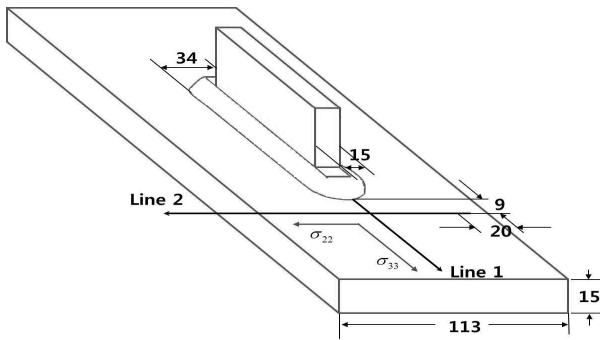


Fig. 11 The measured points of residual stress investigation

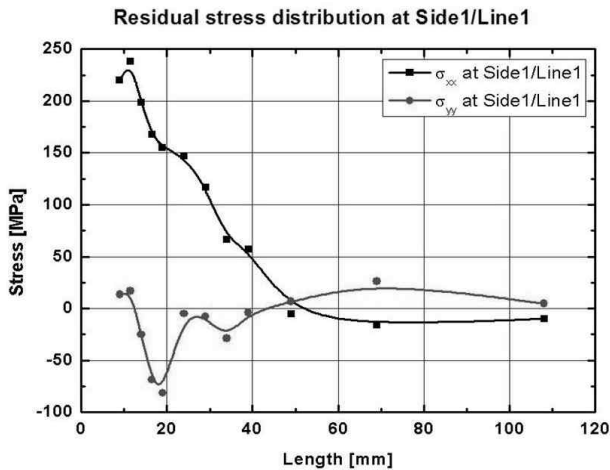


Fig. 12 Residual stress distribution at Side1/Line1

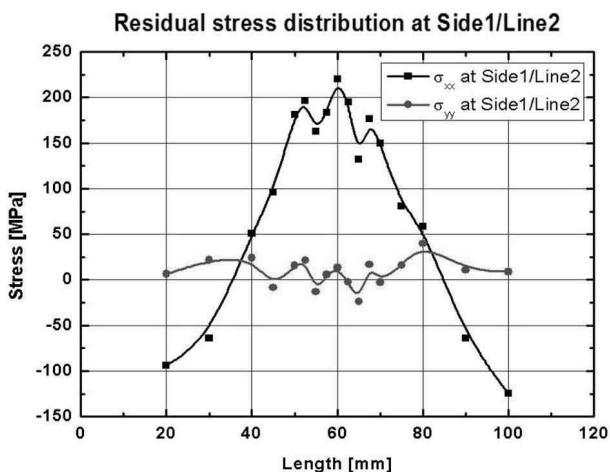


Fig. 13 Residual stress distribution at Side1/Line2

측정된 잔류응력의 분포는 Fig. 12와 Fig. 13에 도시하였다. 용접 용융부의 10mm 떨어진 지점에서 약 250MPa 정도의 인장 응력이 발생하고 약 50mm 지점에서 응력이 0이 되어 그 이후부터는 압축응력인 것을 확인할 수 있다.

4.2 잔류응력 해석 결과

Fig. 14는 해석 결과로 얻은 길이 방향 응력 분포를 보인 것이다.

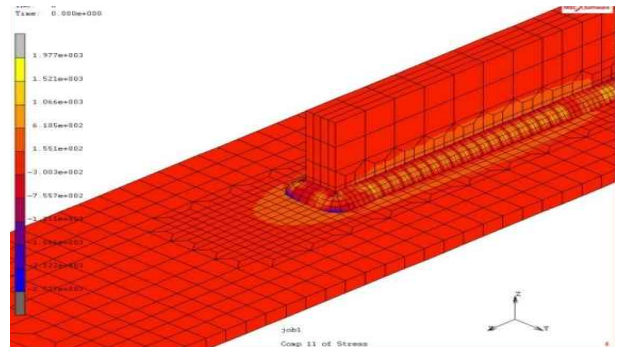


Fig. 14 Initial stress status of welded specimen ($\sigma_{x,x}$) used for MSR analysis

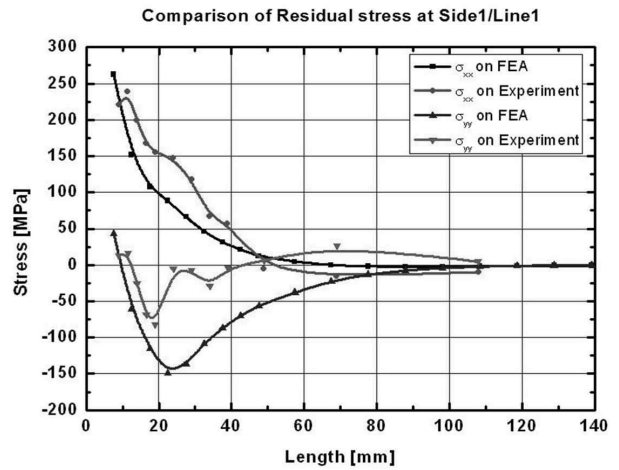


Fig. 15 Comparison of residual stress at Side1/Line1

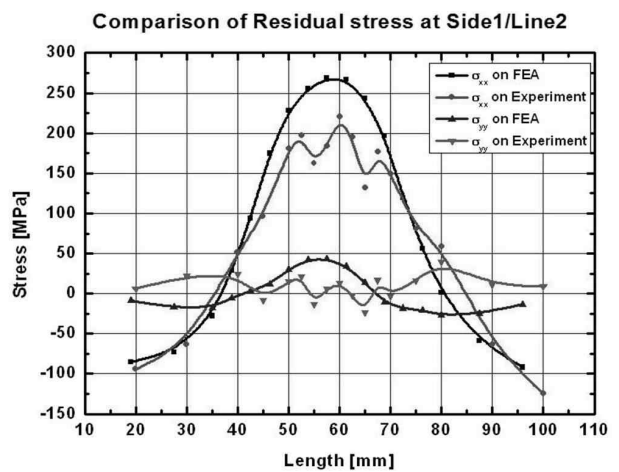


Fig. 16 Comparison of residual stress at Side1/Line2

Fig. 15과 Fig. 16은 각각 계측된 잔류 응력과 해석 결과를 비교하여 나타낸 것이다.

해석 값과 계측 값을 비교한 결과 σ_{xx} 은 해석 값과 측정값이 거의 일치함을 확인 할 수 있으나, σ_{yy} 성분의 경우 일부 측정 점에서 50~150MPa의 오차가 발생하고 있음을 알 수 있다. 그러나 용접잔류응력 해석의 복잡성을 고려하면 정성적인 응력 패턴은 어느 정도 일치한다고 판단된다.

4.3 기계적 응력 저감 실험 및 해석 결과

반복 하중이 가해 진 후 계측된 잔류 응력 값 및 유한요소 해석 결과를 Table 4에 비교하여 정리하였다.

Table 4 Comparison of residual stresses obtained by experiments and FEA (unit: MPa)

Cases	Experimental result		FEA result	
	Residual stress	Residual stress	Residual stress	Residual stress
	(at 0th cycle)	(at 10th cycle)	(at 0th cycle)	(at 10th cycle)
1	234	108	339.53	240.7
2	309	49	339.53	24.7
3	147	111	339.53	329.8
4	385	101	339.53	198.1

용접 용융부에서 2~3mm 떨어진 부분에서의 잔류응력을 측정 하였으며 잔류응력의 이완 정도는 압축 응력보다는 인장 응력에 의한 풀림 효과가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 실험과 해석으로 얻은 값의 오차는 Table 5에 정리하였다. 실험과 해석 결과는 근사하게는 25MPa안팎의 오차를 보이고 있으나, 크게는 150MPa의 오차가 발생하였다. 그러나 잔류응력의 크기 보다는 응력 저감 비율이 더 중요한 만큼 비율을 따지는 것이 더 의미 있는 것으로 판단된다. 물론 이러한 오차를 발생시킨 원인으로는 실험과 해석 모델의 계측 위치의 차이, 각 시편 별 용접 품질, 잔류응력 측정 오차 등이 있을 수 있으나, 응력완화 수준을 파악하는 정보로서는 의미가 있을 것으로 생각된다. 다만 4번 케이스의 실험 결과와 해석 결과의 오차는 다른 실험 조건에 비해 과도한 응력 풀림 현상이 이루어 진 점을 보아 잔류응력 측정 시 생긴 오류라고 생각되나, 해석 모델에 대한 타당성 또한 검토가 필요하다고 생각된다.

Table 5 Comparison of reduction ratio of experiment & FEA

Cases	Experimental result		FEA result	
	Reduction Ratio	Reduction Amount	Reduction Ratio	Reduction Amount
	1	-53.85%	126	-29.1%
2	-84.14%	260	-92.6%	314.8
3	-24.49%	36	-2.94%	9.7
4	-73.77%	284	-41.65%	141.4

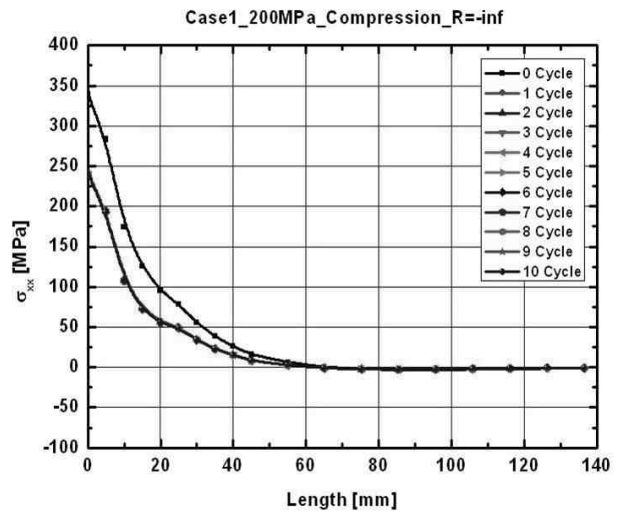


Fig. 17 Redistribution of residual stress at 200MPa compression loading condition

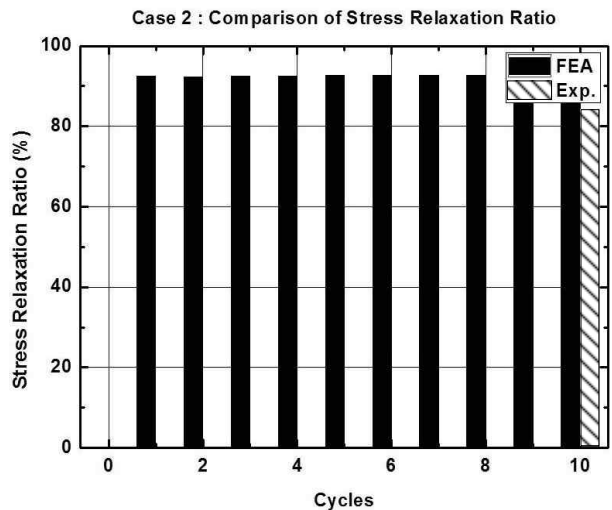


Fig. 18 Comparison of stress relaxation ratio at 5mm from weld toe of Case2

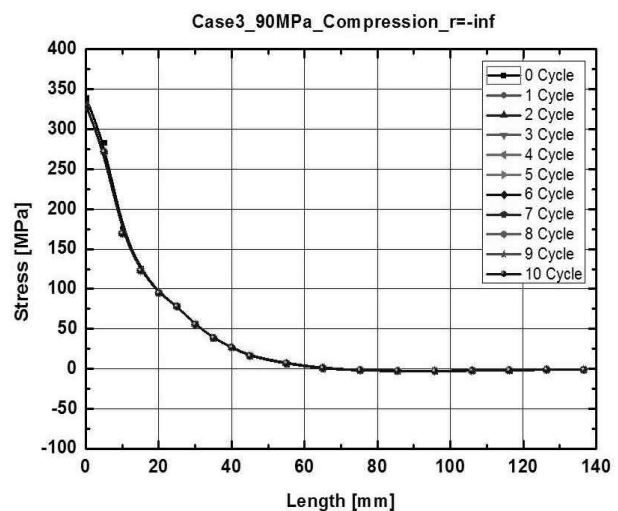


Fig. 19 Redistribution of residual stress at 90MPa compression loading condition

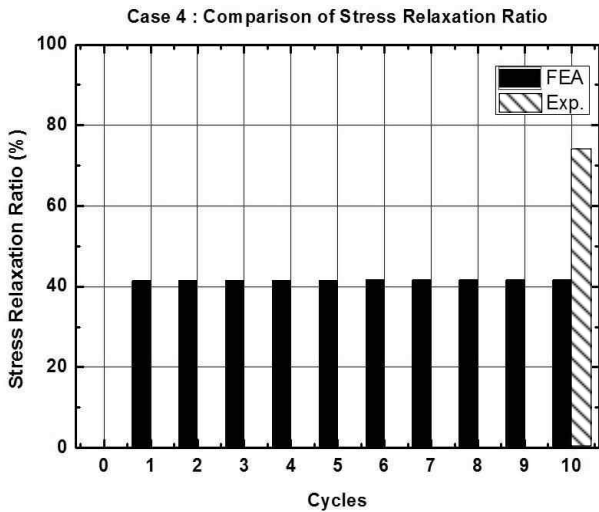


Fig. 20 Comparison of stress relaxation ratio at 5mm from weld toe of Case4

Walker, et al.(1994)의 연구 결과를 통해 가해지는 응력이 커질수록 풀리는 응력의 수준이 더 커지는 점과 응력 풀림 현상 중 가장 큰 차이를 보였던 90MPa의 인장 하중 케이스의 경우에도 같은 크기의 압축 하중에 비하여 풀림 효과가 더 크게 나타나는 것으로 보아 정성적인 면에서는 좋은 결과를 보이고 있다고 판단된다.

Fig. 17부터 Fig. 20은 각각 200MPa과 90MPa의 반복 압축 하중을 가한 모델의 반복 하중 단계 별 잔류 응력 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 각 그래프는 유한요소해석의 결과를 토대로 시편의 길이 방향의 잔류응력 분포에 대한 사이클 별 이완과정과 용접 비드에서 5mm 떨어진 위치에서의 응력 저감 이력을 실험 결과와 해석 결과를 비교하여 도시하였다. 이 결과를 통해 용접 용융 부에서부터 멀어질수록 잔류응력이 이완되는 양이 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있다.

또한, 수치적인 예측에 따르면 2~3회의 하중이 가해진 후의 잔류 응력 형태가 지속적으로 유지되면서 점차 수렴하는 현상을 보이고 있다.

정량적인 값에 있어서 해석과 실험 결과 사이에 오차가 존재하는 것을 확인하였다. 본 연구에서 사용한 해석 모델은 재료의 반복 경화에 따른 미세 조직 변화 및 복잡한 금속 조직학적 변화를 반영하지는 못하고 있을 뿐만 아니라, 용접 해석 및 계측의 불확실성을 감안하여 정량적인 정확성 보다는 정성적인 변화에 의미를 두는 것이 타당할 것으로 보인다. 특히, 용접잔류 응력이 하중의 크기에 따라서 초기 1~2회 하중에 의하여 응력이 완화되며 이후에는 크게 변화가 없다는 기존 문헌의 결과(Zhuang & Halford, 2001)와 정성적으로 일치하는 점은 확인할 수 있었다.

5. 결론

반복 하중 또는 변동 하중을 받는 용접 구조물의 피로 강도를 평가하기 위해서는 초기의 용접잔류 응력뿐만 아니라 하중에 의해

완화된 응력 및 재 분포된 응력을 고려하여야 한다. 본 연구는 응력 저감 효과를 수치적인 모델로써 예측하기 위한 기초연구를 수행하였다. 이를 위하여 반복되는 하중을 받는 용접 구조물의 잔류응력 해석 및 응력 저감 예측을 위한 가공 경화 조건 및 해석 절차를 제시하였다. 유한요소해석을 이용하여 용접잔류응력을 해석하였으며, 잔류응력을 초기 조건으로 부여한 후에 응력 저감 해석을 순차적으로 수행하였다. 또한 해석에 의한 잔류응력 값과 실험을 통해 계측된 값을 비교하였다. 해석을 이용한 잔류 응력은 실험 결과와 비교하여 정성적인 패턴의 타당성을 가질 수 있음을 확인하였다. 또한 최초 몇 차례의 하중에 의하여 응력이 가장 많이 저감되는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구는 반복 하중 또는 변동 하중에 따른 피로 수명 변화 및 실험으로 확장되기 위한 기초 연구로 활용될 수 있을 것으로 사료된다. 차후 정량적인 정확성을 높이기 위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

참고 문헌

- Chang, P.H. & Teng, T.L., 2003, Numerical and Experimental Investigations on the Residual stresses of the Butt-Welded Joints, *Journal of Computational Materials Science*, 29, pp.511-522.
- Do, H.D. et al., 2009, Fatigue Assessment in accordance with Back Plate of Butt Welded Specimens, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(1), pp.24-30.
- Goldak, J. Chakravarti, A. & Bibby, M., 1984, A New Finite Element Model for Welding Heat Sources, *Metallurgical Transactions B*, 15(B), pp.299-305.
- Han, S.H. Lee, T.K. & Shin, B.C., 2002, A Quantitative Estimation of Welding Residual Stress Relaxation for Fatigue Strength Analysis, *Transactions of the Korean Society of mechanical engineers: A*, 26(10), pp. 2018-2035.
- Hwang, S.Y. Lee, J.H. Kim, B.J. & Yang, Y.S., 2010(a), Numerical Analysis of Welding Residual Stresses for Ultra-Thick Plate of EH40 Steel Joined by Tandem EGW, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 47(6).
- Hwang, S.Y. et al., 2010(b), Numerical Analysis of Welding Residual Stresses for Ultra-thick Plate of EH40 TM and API 2W Gr.50 Steel Joined by Flux Core Arc Welding, *Journal of KWS*, 28(3), pp.65-72.
- Kim, K.S. et al., 2008(a), A Study of Crack Propagation and fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(I), *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.669-678.

Kim, K.S. et al., 2008(b), A Study of Crack Propagation and fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure(II), *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.679-687.

Lee, J.B. et al., 2009, Cyclic Stress-strain Hardening Model of AC4C-T6 Alloy at Cryogenic Temperature, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 46(5), pp.498-509.

Lee, J.H. Hwang, S.Y. & Yang, Y.S., 2007, Effect of Melting Pool on the Residual Stress of Welded Structure in Finite Element Analysis, *Journal of Ship & Ocean Technology*, 11(3), pp.14-23.

MSC Software Co. Ltd., 2007, MSC.Marc Volume A: *Theory and User Information*.

Nitschke-Pagel, T. & Dilger, K., 2009, Residual Stress Relaxation in Welded High Strength Steel Steels under Static and Cyclic Loading, *Proceedings of the Nineteenth (2009) International Offshore and Polar Engineering Conference*.

Nguyen, N.T. et al., 1999, Analytical Solutions for Transient Temperature of Semi-Infinite Body Subjected to 3-D Moving Heat Sources, *Welding Journal*, pp.265-274.

Rykalin, R.R., 1974, Energy Source for Welding, *Houdrement Lecture*, International Institute of Welding, pp.1-23.

Smith, D.J. Farrahib, G.H. Zhuc, W.X. & McMahona, C.A., 2001, Experimental Measurement and Finite Element Simulation of the Interaction between Residual Stresses and Mechanical Loading, *International Journal of fatigue*, 23(3), pp. 293-302.

Walker, C.A. Waddal, A.J. & Johnston, D.J., 1994, Vibratory Stress Relief - An Investigation of The Underlying Processes, *Journal of Process Mechanical Engineering*, 209, pp.51-58.

Webster, G.A. & Ezeilo, A.N., 2001, Residual stress distributions and their influence on fatigue lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23(1), pp.375-383.

Zhuang, W.Z. & Halford, G.R., 2001, Investigation of residual stress relaxation under cyclic load, *International Journal of Fatigue*, 23(1), pp.31-37.



양용식



강종규



이장현



김성찬



황세운