

외부하중에 의한 용접 체결부의 잔류응력 이완 특성 해석에 관한 연구

장창두* · 송하철* · 조영천**

*서울대학교 조선해양공학과

**서울대학교 조선해양공학과 대학원

Analysis of Residual Stress Relaxation in Welded Joints due to External Loads

CHANG-DOO JANG*, HA-CHEOL SONG* AND YOUNG-CHUN JO**

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

**Graduate School, Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University, Seoul, Korea

KEY WORDS: Residual Stress Relaxation 잔류응력 이완, Thermal Elastic-plastic Analysis 열탄소성 해석, Welding Residual Stress 용접잔류응력, Fatigue Test 피로 실험

ABSTRACT: Thermal elastic-plastic analysis was performed to assess the initial residual stress distribution of welded joints considering temperature dependent material properties. The test model was the idealized boxing fillet specimen, frequently appeared in the joints of longitudinal and transverse members of ship structure. Residual stress relaxations due to external loads were analyzed by subsequent elastic-plastic analysis considering loading and unloading steps, and the characteristics of residual stress relaxations were discussed with the levels of external loads. Additionally, to define the fatigue life of crack initiation and propagation, the S-N data for each crack length were appraised.

1. 서 론

최근 선박 및 해양구조물에 적합한 피로설계지침을 마련하기 위해 많은 연구가 수행되고 있다. 이와 같은 대형 구조물을 제작하기 위해서는 용접 과정이 필수적으로 수반되는데, 용접가공 시 용접부에 생성되는 잔류응력은 용접부의 피로 수명에 많은 영향을 미친다고 알려져 있어, 잔류응력이 용접부 피로 특성에 미치는 영향 평가는 매우 중요한 관심사로 대두되어 왔다. 이러한 특성 중 외부하중에 의한 용접 잔류응력 이완특성은 실험적, 해석적으로 매우 어려운 과제로 알려져 있는 바 이와 관련된 연구는 매우 드문 실정이다.

이에 따라 본 연구에서는 선체 구조에서 대표적인 피로과피 취약부인, 중부재와 횡부재 결합부를 이상화한, 하중전달형 필렛 용접부를 모델로 하여 피로실험을 수행하고, 용접부 잔류응력 분포를 산정하기 위한 열탄소성해석 및 잔류응력 이완 현상을 시뮬레이션할 수 있는 유한요소해석 기법 개발에 대한 연구를 수행하였다.

2.1 실험 모델

본 연구에서 사용된 실험 및 해석 모델은 피로균열이 빈번히 발생하는 선체 구조에서 중부재와 횡부재가 접합된 부분 또는 중부재와 횡부재의 결합부를 이상화한 boxing fillet 시편이다 (Fig.1). Table 1과 Table 2는 시편의 재료 물성치와 용접조건을 보여주고 있다.

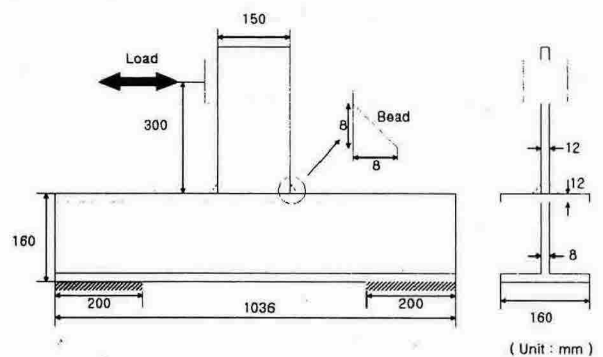


Fig. 1 Details of test model (boxing fillet welded joint)

2. 피로실험

Table 1 Material properties

Yield strength	Tensile strength	Elongation
320 MPa	450 MPa	29 %

제1저자 장창두 연락처: 서울특별시 관악구 신림동 산56-1
02-880-7328 cdjang@snu.ac.kr

Table 2 Welding conditions

Current	Voltage	Speed	Type
280 A	31 V	372.7 mm/min	FCAW

2.2 실험 조건 및 방법

S-N 선도의 작성을 위해 JSME에 제시된 14 points S-N 시험법을 이용하였다 (한중만 등, 2000). 실험에 이용된 하중장치는 최대하중 ±50 ton의 hydraulic dynamic actuator이고, 피로 평가에 사용된 응력으로는 DnV에서 제시하고 있는 2-points extrapolation 법을 이용한 Hot Spot Stress(HSS)를 사용하였다. 하중비 R=0, 반복하중의 주파수는 10Hz로 하였다. 균열발생 및 진전의 계측은 염색 침투 탐상체를 이용하여 확인하고, 이동식 광학 현미경을 이용하여 균열길이를 계측하였다. 특히 균열진전 길이에 따른 피로 수명을 제시하기 위해 일정반복 수마다 균열 길이를 측정하였다.

2.3 실험 결과

도출된 피로선도는 Fig. 2와 같다.

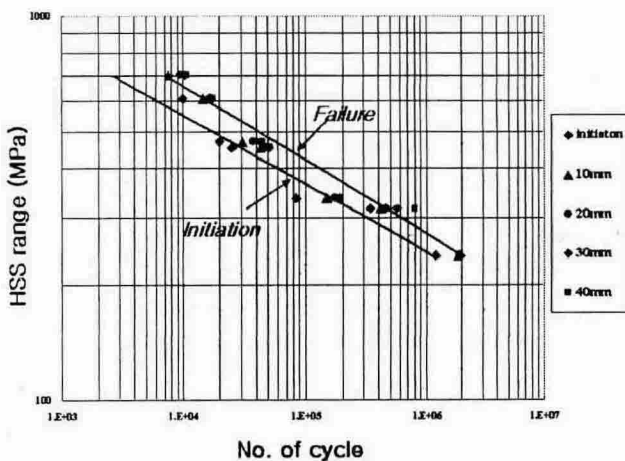


Fig. 2 S-N curves for each crack length

3. 열탄소성해석을 이용한 용접잔류응력의 산정

3.1 해석 방법 및 모델

용접잔류응력의 분포를 추정하기 위해 열탄소성해석을 수행하였다. 해석을 위해 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였으며, 해석 방법은 열전달 현상과 열응력 현상의 연성이 없다는 것을 가정하여 순차적으로 해석을 수행하였다. 즉, 해석 모델에 입열원(heat input source)을 가하여 온도분포 결과를 구하는 열전달 해석을 수행하고, 이 온도분포 해석결과를 열응력 해석에서의 하중으로 치환하여 탄소성 해석을 수행하면, 모델의 용접잔류응력 분포를 추정할 수 있다.

열전달 해석에서 사용되는 유효입열률, q_{eff} 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다 (이창현, 2002).

$$q_{eff} = \eta \cdot V \cdot I \tag{1}$$

여기서, η 는 thermal efficiency로 일반적으로 0.7을 사용한다. 그리고, V 와 I 는 각각 용접시의 전압과 전류 값으로 시편 제작시의 용접조건을 사용하였다. 사용된 유한요소는 solid 70이며, 기하학적 대칭조건을 고려하여 1/4 모델을 이용하였다(Fig. 3). 투입 열량은 실제 용접 속도를 고려하여 해석 단계별로 일정체적의 용접 비드를 선택하여 투입하였다(Fig. 4).

열탄소성해석에 사용된 온도 의존성 물성치는 Table 3과 같다 (이창현, 2002).

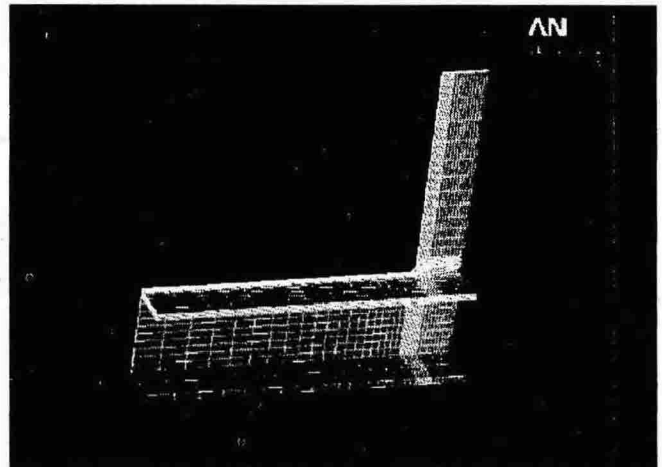


Fig. 3 FE modeling for thermal elastic-plastic analysis

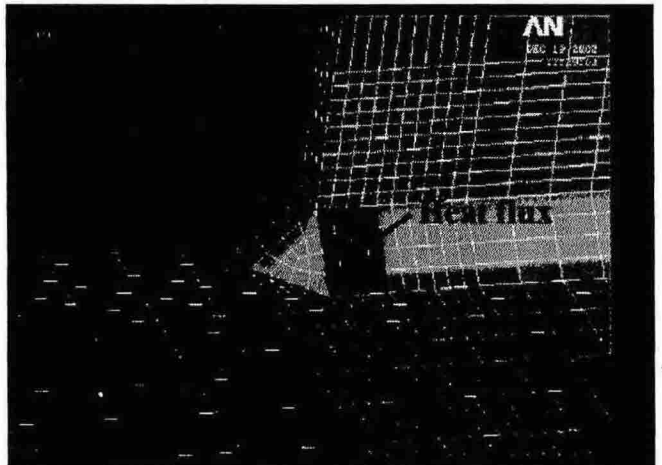


Fig. 4 Input modeling of heat flux at weld bead

3.3 해석 결과

열탄소성해석을 수행하여 산정된 용접 체결 부에서의 잔류응력 분포는 다음 Fig. 5 및 Fig. 6과 같다. 그림에 표기된 inside와 outside는 각각 보강재 부분과 형강 부분에 해당된다 (이상갑 등, 1999).

Table 3 Temperature dependent material properties

T	E	σ_Y	ν	ρ	α	C	k	h_c
0	206.0	320.0	0.29	7830	1.16	435.83	52.7	0.50
100	201.0	310.9	0.31	7780	1.22	463.78	51.9	1.30
200	198.0	300.6	0.33	7740	1.27	491.74	51.1	1.50
300	191.0	281.1	0.35	7720	1.31	518.42	48.6	1.60
400	181.0	260.4	0.37	7710	1.35	557.81	44.4	1.70
500	175.0	239.7	0.39	7680	1.39	601.02	42.7	1.79
600	163.0	187.9	0.41	7650	1.44	667.09	39.4	1.86
700	121.0	113.6	0.43	7640	1.49	749.68	35.6	1.92
800	80.3	57.7	0.44	7620	1.26	1108.0	31.8	1.98
900	39.2	15.9	0.45	7600	1.24	817.03	26.0	2.04
1000	19.6	5.08	0.48	7580	1.34	626.43	26.4	2.09
1100	17.0	3.65	0.48	7550	1.42	622.62	27.2	2.14
1200	15.0	3.23	0.48	7540	1.48	622.62	28.5	2.18
1300	13.7	2.94	0.48	7500	1.54	637.86	29.7	2.22
1400	13.4	2.88	0.48	7200	1.61	645.49	30.5	2.26
1482	13.2	2.82	0.48	7200	1.66	645.49	105	2.29
2227	11.1	2.38	0.48	7200	2.16	645.49	105	2.32

where,

- T : Temperature [$^{\circ}\text{C}$]
- σ_Y : Yield stress [MPa]
- ρ : Density [kg/m^3]
- C : Specific heat [$\text{J}/\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
- k : Thermal conductivity coefficient [$\text{J}/\text{m} \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
- h_c : Heat convective coefficient [$\text{J}/\text{m}^2 \cdot \text{sec} \cdot ^{\circ}\text{C}$]
- E : Young's modulus [GPa]
- ν : Poisson ratio
- α : Thermal expansion coefficient [$^{\circ}\text{C}^{-1}$]($\times 10^{-5}$)

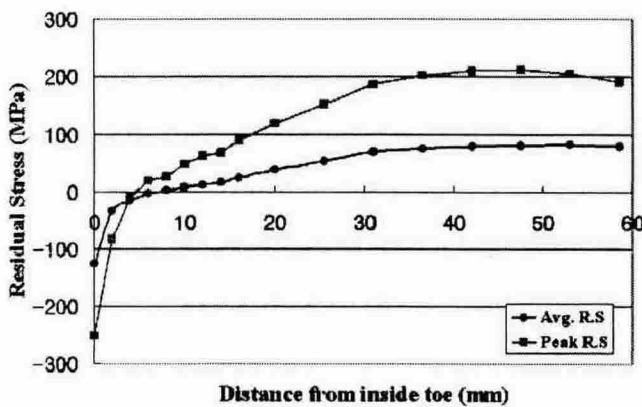


Fig. 5 Residual stress distribution at inside toe

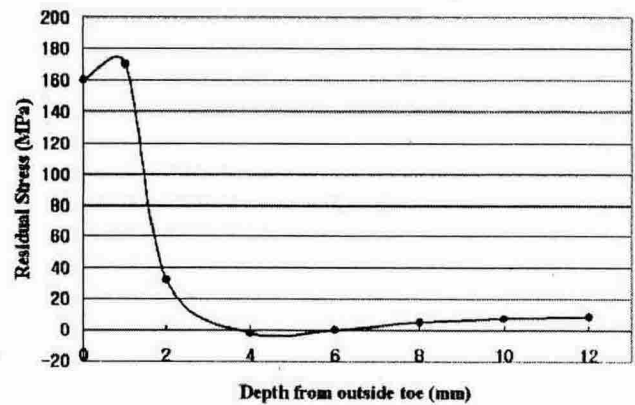


Fig. 6 Residual stress distribution at outside toe

4. 잔류응력이완 특성 평가

5. 결 론

4.1 잔류응력이완 시뮬레이션

용접부의 잔류응력이완 현상을 시뮬레이션하기 위해 상기한 열탄소성해석이 완료된 후 추가적인 해석을 수행하였다. 해석방법은 열탄소성 해석 후에 외부 하중을 몇 단계로 나누어 하중을 부하시키고 제하시키는 탄소성 해석을 수행하였다. 예를 들어, 2.4 ton의 외부하중에 대한 잔류응력 이완 시뮬레이션을 수행하기 위해 하중을 0.2 ton씩 12 스텝으로 나누어, 부하 및 제하 과정에서 필요한 총 24단계의 탄소성 해석을 수행하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

Fig. 7과 Fig. 8은 평가 모델에서 외부하중 1.8 tonf, 2.4 tonf, 3.0 tonf를 부하 및 제하 하였을 때, 용접체결 부에서 이완되는 잔류응력 분포를 초기 잔류응력 분포와 비교한 것이다.

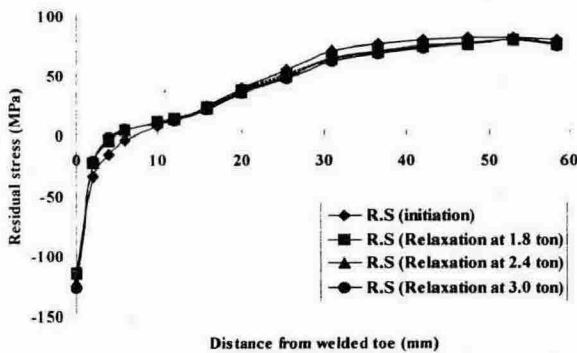


Fig. 7 Residual stress comparison at inside toe

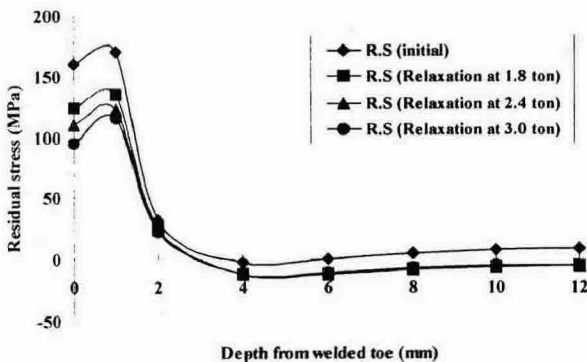


Fig. 8 Residual stress comparison at outside toe

위의 그림으로부터 알 수 있듯이, 작용하는 외부 하중의 크기가 클수록 잔류응력의 이완 정도가 커짐을 알 수 있다. 또한 압축잔류응력장에서의 잔류응력 이완현상은 인장잔류응력장과 비교하였을 때 이완 현상이 거의 나타나지 않는 것을 알 수 있어 기존의 관련 연구와 동일한 특성을 가지는 것으로 평가되었다 (신병천 2001).

본 논문에서는 선체 구조물에 있어서 피로 균열이 빈번하게 발생하는 종부재와 횡부재의 결합부분을 이상화한 boxing fillet 모델에 대해 피로실험을 수행하고, 열탄소성 해석에 따른 용접 잔류응력 해석과 잔류응력의 이완 특성을 시뮬레이션하여 다음의 결론을 얻었다.

- 온도 의존 물성치를 도입한 용접 열탄소성해석을 수행하여 용접부에서의 잔류응력분포를 산정하였으며, 보강재와 형강 부분에 있어 인장/압축 잔류응력이 교차, 발생함을 확인하였다.
- 잔류응력 이완 모델을 제시하여, 적용 하중의 크기에 따라 잔류응력의 이완 정도가 비례적으로 커짐을 확인하였다. 또한, 압축잔류응력장에서는 잔류응력의 제하과정이 수반되므로 인장잔류응력장과는 달리 잔류응력이 거의 이완되지 않음을 확인하였다.

참고 문헌

- 신병천 (2001). 대형용접구조물의 피로수명 예측기술 개발, 한국기계연구원 보고서, UCN325-882.M
- 이상갑, 이윤기, 김화수, 김도현 (1999). "잔류응력이 피로수명에 미치는 영향", 대한조선학회 학술발표회 논문집, pp. 390-393
- 이상갑, 이윤기, 김화수, 김도현 (1999). "평균응력의 피로강도에 미치는 영향", 대한조선학회 학술발표회 논문집, pp. 394-397
- 이창현 (2002). 고유변형도 기반 등가하중법을 이용한 선체 평블록의 용접변형 예측, 공학박사학위논문, 서울대학교
- 장창두, 송하철, 조영천, 이한영 (2003). "응력집중을 고려한 하중 전달형 필렛 용접부의 피로수명평가", 대한조선학회 학술발표회 논문집, pp. 441-446
- 한중만, 강중규, 김유일, 전유철 (2000). 피로실험을 통한 선체 주요 용접부재의 피로수명 예측기술 개발, (주)대우조선 선박해양기술연구소