

국부변형을 이용한 용접후열처리 전후 시편의 피로수명 해석

이동형[†]·서정원*·구병춘**·석창성***

Fatigue Life Analysis of Butt-welded Joint with and without Postweld Heat Treatment by Local Strain Approach

Dong-Hyoung Lee, Jeong-Won Seo, Byeong-choon Goo, Chang-Sung Seok

Key Words: Butt Weld(맞대기 용접), Postweld Heat Treatment(용접후열처리), Residual Stress(잔류응력), Residual Stress Relaxation(잔류응력 이완), Local Strain Approach(국부변형률근사법), Fatigue Life(피로수명)

Abstract

The problem of residual stresses and fatigue behavior in welded structures is the main concern of welding research fields. The residual stresses and distortions of structures by welding exert negative effect on the safety of mechanical structures. Postweld heat treatment is usually carried out to relieve this residual stresses of welded joints. In this paper the influence of postweld heat treatment on fatigue life of butt-welded joint was investigated. To predict the effect of PWHT, an analytical model is developed by finite element and local strain approach and the result of fatigue life analysis is compared to experimental results. It is demonstrated that fatigue life estimates closely approximate the experimental results and PWHT provides some increase of fatigue lives in long-life fatigue region and no increase in short-life fatigue region because of the residual stress relaxation under tensile loads.

1. 서 론

기호설명

- : 재료의 상당응력, [MPa]
- A, m, n : 크립 정수
- σ_f' : 피로강도계수(fatigue strength coefficient)
- ϵ_f' : 피로연성계수(fatigue ductility coefficient)
- b : 피로강도지수(fatigue strength exponent)
- c : 피로연성지수(fatigue ductility exponent)
- K' : 반복 강도계수(cyclic strength coefficient),
- n': 반복변형률경화계수(cyclic strain hardening exponent)

기계 구조물의 접합방법으로 용접은 작업의 용이성, 구조물의 단순화, 기밀의 우수성 등의 장점 때문에 철도, 교량, 선박 등 많은 기계 구조물 제작에 이용되고 있다. 그러나 용접시 국부적으로 작용하는 높은 열에 의한 재료의 팽창과 냉각시 수축 변형은 용접부재에 인장 및 압축 잔류응력을 유발시키며, 발생한 인장 잔류응력은 용접 구조물의 파괴 및 피로강도에 크게 영향을 미치는 요인이 되고 있다. 따라서 용접 구조물의 금속조직과 경도분포의 불균일성을 없애고, 인장 잔류응력에 의한 피로강도의 저하 및 치수변화(변형)등을 최소화 하기 위하여 용접후열처리(Postweld heat treatment, PWHT) 또는 기계적 응력 완화법(Mechanical stress relieving treatment, MSR)을 수행하고 있다. 철도차량 기계 구조물(예, 대차(bogie))의 경우 구조적인 문제로 인하여 기계적 응력완화법을 적용하기가 곤란하므로

[†] 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

E-mail : dhlee@krii.re.kr

TEL : (031)460-5246 FAX : (031)460-5289

*,** 한국철도기술연구원 차량기계연구본부

*** 성균관대학교 기계공학과

용접후열처리를 적용하여 잔류응력을 완화 시키고 있다.

이와 같은 용접후열처리는 제작공정에서 시간과 비용을 많이 차지하고 있고 실제 철도차량의 장기간 운행시 피로수명에 미치는 영향 등에 관하여 불확실한 부분이 많으므로 이 방법의 유효성에 관하여 의심이 되고 있다. 실제 외국의 사례를 살펴보면 용접후열처리를 수행하지 않은 대차의 경우 장기간 사용하여도 피로수명에 크게 영향을 미치지 않았다는 보고가 있으며⁽¹⁾ 발표된 연구결과에서는 용접시 발생하는 인장 잔류응력이 피로강도에 나쁜 영향을 미친다는 결과와 영향을 미치지 않는다는 연구결과⁽²⁾가 있으므로 명확한 결론이 수립되어 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 잔류응력 제거를 위해 수행하는 용접후열처리가 피로수명에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위하여 철도차량 대차 제작에 많이 적용되고 있는 용접구조용 압연강재(SM490A)로 제작된 맞대기 용접시험편을 대상으로 용접후열처리를 수행한 시험편과 용접후열처리를 수행하지 않은 시험편을 대상으로 피로수명해석을 수행하였다.

수명해석은 용접시 발생하는 잔류응력을 고려하고, 용접부의 기하학적인 불연속에 의하여 발생하는 국부응력(local stress)과 국부변형률(local strain)을 탄소성 유한요소해석을 통하여 구한 후 국부변형률 근사법(local strain life)을 적용하여 피로균열 발생 수명을 예측하였고, 용접부 균열진전 해석을 통하여 균열진전수명을 계산하였다. 이러한 예측결과는 시험편의 피로수명 시험결과와 비교, 고찰되어 예측방법의 신뢰성을 검토하였다. 용접부 잔류응력 및 응력집중부의 탄소성 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 'ABAQUS'를 사용하였다.

2. 수치해석

2.1 해석모델

용접부 해석을 수행하기 위한 시험편은 길이 200mm, 폭 25mm, 두께 10mm의 X형 맞대기 용접 시험편이며 개선각은 90°, 루트면은 2mm, 루트간격은 2mm이다. 시험편 재료는 철도차량 구조물에 사용하고 있는 용접구조용 압연강재(SM490A)이다. 시험편의 용접후 잔류응력 해석을 위한 열유동 해석 및 열응력 해석에 사용한 모델은 이 용접시험편이 좌우 대칭이므로 시험편의 1/2을 해석대상으로 선정하였다. 또한, 용접부의 정확한 해석을 수행하기 위하여 3차원 해석을 수행하였고, 해석에 사용된 모델은 Fig. 1 과 같이 20절점 2차 블럭 요소(20-node quadratic brick element)를 사용하였으며, 용접부

및 열영향부, 모재부로 나누어 모델링 하였다. 높은 온도구배 및 응력집중을 가지는 영역은 조밀하게 구성하였으며, 최종 모델은 절점 10,034개, 요소는 2,020개이다. 또한 용접비드의 형상에 따라 응력집중이 발생하여 피로수명에 많은 영향을 미치므로 시험편 제작 후 비드형상을 측정하여 평균적으로 나타나는 비드의 용접각도(θ) 40°와 비드에 접하는 원의 반지름(r) 2mm 를 고려하여 모델링 하였다.

해석 및 시험제작에 사용된 용접방법은 GMAW(Gas Metal Arc Welding) 용접이고 용접조건은 Table 1 과 같이 3 pass로 수행하였으며, 용접물에 전달된 입열량은 잔류응력 계산의 정확성을 위하여 실제 용접시 온도 측정결과와 유사하도록 하였다.

2.2 열전달 및 잔류응력 해석 방법

용접현상의 열전달 해석에 사용한 열원의 형태는 요소에 균일하게 작용하는 열원(body flux)를 사용하였고, 용접시 고온에서 용융부의 고상과 액상의 상변화 효과를 반영하기 위하여 잠열(latent heat)을 고려하였다. 열전달 해석시 정확한 재료의 물성치는 기존 연구자료의 연강 재료 물성치⁽³⁾를 이용하였고, 표면의 경계조건으로 자연대류경계조건 $20W/m^2K$ 를 적용하였으며, 주위온도는 20°C로 설정하였다.

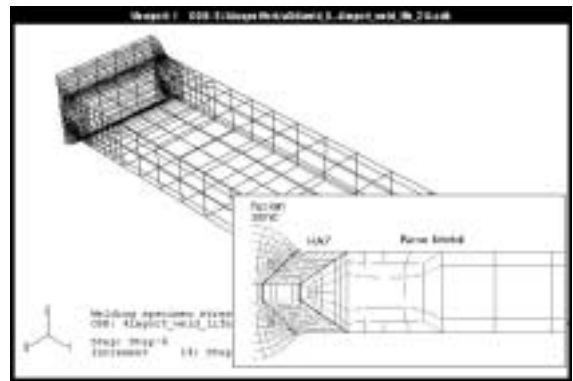


Fig. 1 FEM model for butt welded specimen

Table 3 Welding conditions

Material	SM490A		
Wire Size	ϕ 1.2		
	Pass 1	Pass 2	Pass 3
Welding Speed (cm/min)	29	18	18
Voltage (V)	103	105	105
Amperage (A)	150	190	180

열전달 해석을 통하여 열원이 이동하는 동안의 온도분포를 각 시간단계에서 계산한 후, 이 과도 온도 분포를 하중으로 입력하여 열탄소성 해석을 수행함으로써 용접 후 발생하는 잔류응력을 계산하였다. 열탄소성 해석에 사용되는 온도에 따른 재료 물성치는 기존 연구자료의 연강 재료 물성치⁽³⁾를 이용하였다. 경계조건으로는 좌우 대칭면에 대칭조건 및 용접부 중심에 회전을 방지하기 위하여 y, z방향으로의 변위를 고정하였다.

또한 후열처리 해석시 초기응력은 3차원 열탄소성 수치해석시의 용접잔류응력을 사용하였다. 후열처리 해석시 평면변형 열탄소성 크립해석에 사용한 크립법칙은 식(1)의 시간경화 법칙(Norton law)을 사용하였고, 해석에 필요한 크립 상수는 연강의 기존 발표자료⁽⁴⁾를 이용하였다.

$$\dot{\epsilon}_c = A\sigma^m t^n \dots\dots\dots (1)$$

후열처리 해석조건은 현재 철도차량 대차 제작에 사용하고 있는 조건인 유지온도 600℃에서 1시간으로 하였고 가열 및 냉각속도는 시간당 200℃이하로 하였다. 크립은 유지 및 냉각시에 발생하고, 냉각시 온도 400℃이하에서는 크립변형률(creep strain)이 작기 때문에 발생하지 않는 것으로 하였으며, 용접부 및 열영향부, 모재부의 크립속도는 전부 동일하다고 가정하였다.

2.3 균열발생수명 해석 방법

용접부의 피로파손은 용접 결함이나 기하학적인 불연속부에 발생하는 응력집중에 의한 것으로 알려져 있다. 이와 같은 용접부 노치 부분에 하중을 받게 되는 경우 국부적으로 소성변형을 일으키며 이 영역에서 균열이 발생한다. 따라서, 용접부의 균열 발생수명을 예측하기 위하여 용접부 노치부분의 응력과 변형률을 정확히 계산하여야 하며, 이를 이용하여 여러 가지 수명예측 방법을 적용하고 있다. 본 논문에서는 잔류응력의 영향을 고려하여 균열발생수명을 예측하기 위하여 국부변형률근사법(local strain life)을 적용하였다. 국부변형률근사법(local strain life)에 의한 피로수명 예측시 반복 응력-변형률 특성치가 필요하며, 정적 인장하중 해석결과 기하학적 불연속에 의해 취약부위인 열영향부(HAZ)부의 반복응력-변형률 특성치를 사용하였다. 열영향부의 반복응력-변형률 특성치는 실제 실험결과로부터 구할 수 있으나, 용접 시험편 제작후 용접부를 중심으로 15mm까지 경도를 측정하여 경도시험결과로부터 반복 응력-변형률 특성치를 참고문헌의 시험결과⁽⁵⁾를 이용하여 추정하였다. 해석에 적용한 열영향부의 반복 응력-변형률 특성치는 평균 경

도 167HB를 적용하여 추정하였고, 용접시험편 및 후열처리 시험편 모두 동일하게 적용하였으며, Table 2 와 같다.

국부변형률근사법(local strain life)에 의한 피로 균열 발생수명 예측에는 평균응력을 고려할 수 있는 식(2)의 Morrow 식과 식(3)의 Manson and Halford 식, 식(4)의 SWT(Smith, Watson, and Topper) 식을 적용하여, 수명예측의 적합성을 검토하였다.

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f (2N_f)^c \dots\dots\dots (2)$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma'_f - \sigma_0}{E} (2N_f)^b + \epsilon'_f \left(\frac{\sigma'_f - \sigma_0}{\sigma'_f} \right)^{c/b} (2N_f)^c \dots\dots\dots (3)$$

$$\sigma_{max} \epsilon_a = \frac{(\sigma'_f)^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma'_f \epsilon'_f (2N_f)^{b+c} \dots\dots\dots (4)$$

여기서, $\sigma_{max} = \frac{\Delta\sigma}{2} + \sigma_0$
 $\sigma_0 =$ 평균응력 이다.

해석에 사용한 하중조건은 실험조건과 같은 R=0인 편진 인장하중을 사용하였으며, 유한요소해석에 사용된 재료의 경화조건은 반복하중을 받을 때 재료의 항복응력이 소성변형에 따라 선형적으로 변하고 Bauschinger 효과를 표현할 수 있는 이동성경화(kinematic hardening) 모델을 사용하였다. 반복하중하의 항복강도는 0.2% offset 방법을 사용하여 결정하였으며, 이상화된 곡선의 기울기 결정에는 변형률범위(strain range)는 3%에서 만나는 점을 각각 사용하였다. Fig. 2는 잔류응력 해석 및 수명해석에 사용한 모재부, 용접부 및 HAZ부의 반복 응력-변형률곡선과 이동성 경화 조건을 나타낸다.

최대 주변형률이 같다면 단축 및 다축조건에서 같은 수명을 나타낸다는 최대 주변형률 이론⁽⁶⁾에 따라 유한요소해석을 통하여 처음 하중부까지 최대 주변형률을 나타내는 지점의 주응력과 주변형률의 변화량을 구하고 식(2)~식(4)를 적용하여 수명해석을 수행하였다. 수명해석시 많은 반복계산이 필요하

Table 4 The fatigue properties of base, weld, and heat affected materials for SM490A steel welds

Material	σ'_f (MPa)	ϵ'_f	b	c	n'	K' (MPa)
SM490A	1003.3	0.178	-0.113	-0.458	0.245	1530.4
SM490A-HAZ	934.75	0.573	-0.09	-0.56	0.1607	1022.2

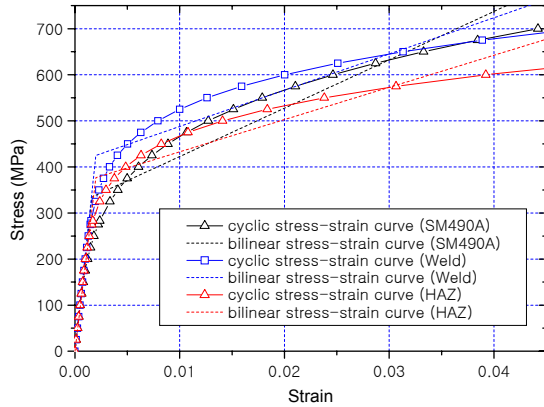


Fig. 2 Idealized cyclic stress-strain curve

므로 수치계산 프로그램을 작성하였으며, 프로그램에서 하는 Newton-Raphson Method를 사용하여 구하였다.

균열진전수명해석은 Paris 식을 사용하였고, 반복하중에 의한 잔류응력 이완이 생기기 때문에 균열진전해석에서 잔류응력의 영향은 고려하지 않았다. 균열형상은 3차원 유한요소해석결과 용접시편의 경우 폭방향으로 중간 지점에서 잔류응력이 가장 크고, 반복하중 작용시 큰 응력과 변형률의 변화를 나타내므로 용접 중앙의 반원 균열(semi-circular crack)로 가정하여 식(5)를 적용하였다.

후열처리 시편의 경우 잔류응력 이완으로 폭 방향으로 양쪽 끝단에서 가장 큰 응력과 변형률을 나타내므로 편측 모서리 균열(single-edge crack)로 가정하여 식(6)을 적용하였다. 초기균열길이(a_i)는 0.1mm, 최종균열길이(a_f)는 폭의 반인 12.5mm로 계산하였다. 균열진전수명해석에 사용한 식은 다음 (7)식과 같고, 재료상수인 C, m은 용접구조용강의 실험결과⁽⁷⁾를 이용하였다.

$$\Delta K_I = 1.12 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(5)$$

$$\Delta K_I = 0.713 \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \dots\dots\dots(6)$$

$$N_f = \int_{a_i}^{a_f} \frac{da}{C(\Delta K_I)^m}$$

$$= \frac{2}{(m-2)C(\Delta K_I)^m} \left(\frac{1}{a_i^{(m-2)/2}} - \frac{1}{a_f^{(m-2)/2}} \right) \dots\dots\dots(7)$$

3. 해석결과 및 고찰

3.1 열전달 및 잔류응력 해석 결과, 고찰

Fig. 3은 첫 번째 용접(pass 1)이 진행될 때 용접선에서 10, 20, 30mm 위치에서 측정한 온도와 열전달해석 결과를 비교한 그래프이다. 첫 번째 용접시 10mm 떨어진 위치에서 최고 210°C정도의 온도상승이 발생하였으며 해석결과가 실험결과보다 약간 높은 온도상승량을 나타내고 있으나, 실험시의 오차등을 고려할 때 어느정도 일치하는 것으로 판단하였다.

Fig. 4는 용접시편편 폭의 중심에서 용접선에 직각인 위치에 따른 용접선 길이방향의 잔류응력 (S_{33}) 및 용접선에 직각인 방향의 잔류응력(S_{11})의 해석 및 실험결과를 나타낸다.

잔류응력의 측정은 Hole-drilling 방법과 절단법을 병행하여 사용하였고 용접비드에서 10mm, 30mm, 60mm 위치에 게이지를 부착하였다. 잔류응력 해석결과 용접선 길이방향의 잔류응력은 용접부 중앙에 370MPa 정도의 큰 인장잔류응력이 발생하였고, 용접선에서 멀어질수록 급격한 감소를 나타내고 열영향부와 모재부의 만나는 지점 근처에서 압축잔류응력이 나타나고 있다. 용접선 직각방향의 잔류응력은 열영향부와 모재부의 만나는 지점 근처에서 큰 인장잔류응력이 발생하였으며 이와 같은 결과는 열영향부와 모재부의 경화조건이 다르기 때문에 불연속부에 의한 것으로 생각된다. 잔류응력 측정결과와 비교하면 인장응력의 분포가 대체로 유사함을 나타내었다.

Fig. 5는 후열처리 시편편의 잔류응력 해석 및 실험결과를 나타낸다. 후열처리를 수행한 시편편의 잔류응력은 후열처리 온도 및 유지시간에 따라 차이가 발생하지만, 본 연구의 후열처리 해석에 의한 용접선 길이방향의 잔류응력은 최대 약 230MPa 정도, 용접선 직각방향의 잔류응력은 250MPa 정도 이완되었으며, 후열처리 시편편의 잔류응력 측정결과와 비교하면 경향이 유사하였다.

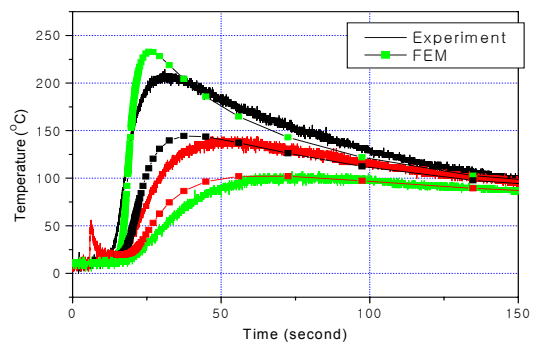


Fig. 3 Temperature change in welding process(pass 1)

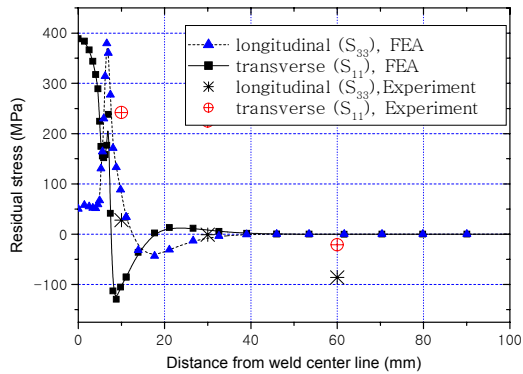


Fig. 4 Residual stress after weld

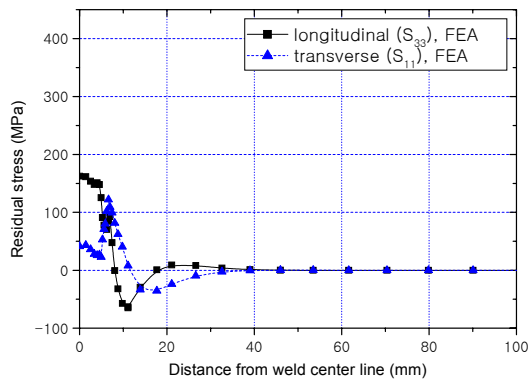


Fig. 5 Residual stress after PWHT

3.2 피로수명 해석 결과 및 고찰

Fig. 6은 용접시편의 탄소성 유한요소해석 및 국부변형률방법, 균열진전 해석을 이용하여 예측된 피로수명과 피로실험으로부터 얻어진 피로수명과의 관계를 직접 비교하여 나타낸 그림이다. 그림중의 일점쇄선은 오차계수 2 및 1/2을 나타내는 선으로 각각 예측수명이 실제수명의 2배 및 1/2배가 된다는 것을 의미하며 수명예측의 일치여부의 기준으로 생각하였다. 용접시편의 실험결과와 비교하여 Morrow 식이나 Manson-Harford의 제안식에 비하여 SWT식이 약 2배 이내의 오차범위에서 더 근접한 예측결과를 나타내고 있다.

Morrow 식으로부터 얻어진 예측결과를 살펴 볼 때 전체적으로 긴수명을 나타내고 있으며 탄성변형이 지배하고 소성변형이 작은 영역에서 평균응력의 영향을 고려하고 있기 때문에 소성이 발생하는 용접 필렛부의 상황을 정확하게 반영하지 못한 것으

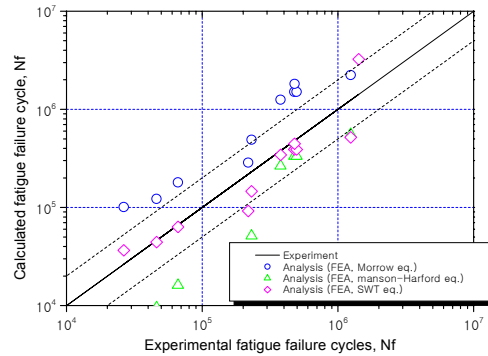


Fig. 6 Comparison of total fatigue life predictions and experimental results (Weld specimen)

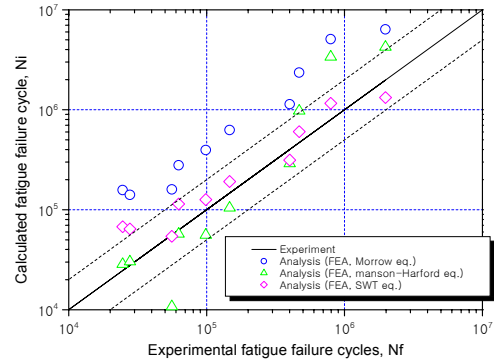


Fig. 7 Comparison of total fatigue life predictions and experimental results (PWHT specimen)

로 생각된다.

Manson-Harford 식으로부터 얻어진 예측결과는 국부변형률 계산식에 탄성역 및 소성역에 평균응력의 효과를 도입한 것으로 하중이 크게 작용하는 영역에서는 시험결과와 비교하여 짧은 수명을 나타내고 있다. 이에 비해 SWT 식의 경우 다른 식의 경우보다 가장 좋은 예측결과를 보이고 있다.

Fig. 7은 후열처리 시편의 해석결과를 시험결과와 비교한 그래프이며, 용접시편의 수명예측 결과와 비교하여 전반적으로 약간 더 큰 수명을 나타내고 있으나 3가지 수명예측식에 대하여 용접시편의 해석결과와 유사한 형태의 예측결과를 나타내고 있다. 후열처리 시편의 경우 적용된 반복 응력-변형률 특성치가 용접시편의 경우와 동일하게 적용되었기 때문에 수명예측결과가 전반적으로 크게 나온 것으로 생각되며, 정확한 예측을 위하여 후열처리시 재료의 피로특성치의 실험데이터의 확보가 필요하다.

Fig. 8은 용접시편과 후열처리 시편의 실험결과와

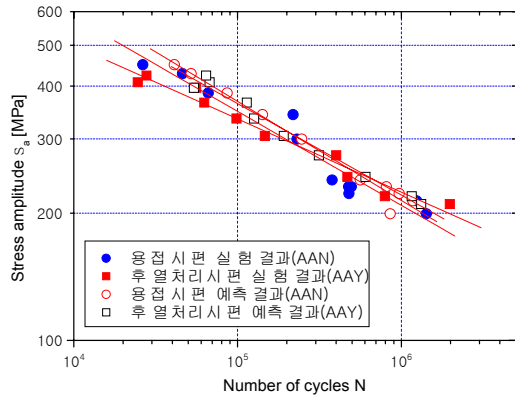


Fig. 8 Comparison of total fatigue life predictions and experimental results

SWT식을 적용한 수명해석결과를 나타내고 있다. 피로실험결과 및 해석결과를 살펴보면 후열처리를 수행할 경우 낮은 인장하중이 작용할 때 피로수명은 약간 증가하는 경향이 있으며, 높은 인장하중이 작용할 경우 다소 수명이 줄어드는 경향을 보이고 있다. 2×10^6 cycles 일 때의 피로한도는 실험 및 예측결과가 거의 비슷하게 나타내며, 피로한도를 기준으로 비교할 때 용접시편의 피로한도는 후열처리를 수행한 경우가 후열처리 전의 경우보다 약 11% 증가됨을 알 수 있다. 반면에 높은 응력, 높은 평균하중 상태에서 용접부 응력집중부에 발생하는 큰 반복 소성응력이 용접부의 잔류응력을 이완시켜 용접시편과 후열처리 시편에 대하여 해석결과는 큰 차이가 없었으나, 실험결과에서는 오히려 후열처리 시편이 짧은 수명을 나타내고 있다.

4. 결론

잔류응력 제거를 위해 수행하는 용접후열처리가 피로수명에 미치는 영향을 정확하게 파악하기 위하여 용접후열처리 전후 시험편을 대상으로 피로수명 해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 2×10^6 cycles 일 때의 피로한도는 실험 및 예측결과가 거의 비슷한 피로한도를 나타내며, 피로한도를 기준으로 비교할 때 용접시편의 피로한도는 후열처리를 수행한 경우가 후열처리 전의 경우보다 약 11% 증가된다.

(2) 높은 응력, 높은 평균하중 상태에서 용접부 응력집중부에 발생하는 큰 반복 소성응력이 용접부의 잔류응력을 이완시켜 용접시편과 후열처리 시편에 대하여 피로수명 해석결과는 큰 차이가 없었다.

(3) 예측된 피로수명들은 대체적으로 Manson-Harford 식을 적용한 경우 보수적(conservative)인 결과를 나타내며, Morrow 식의 경우 비보수적(nonconservative)인 결과를 나타내고 SWT식의 경우가 2배 이내의 적은 오차범위에서 실험수명과 적절한 상관관계를 나타낸다.

(4) 후열처리 시편의 경우 반복 응력-변형률 특성치의 정확한 평가를 통하여 후열처리 구조물에 대한 신뢰성 있는 피로수명예측이 가능할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2003년도 과학기술부 국가지정연구실 사업인 “철도차량 구조물의 잔존수명 평가 기술 개발”의 일환으로 수행된 연구결과의 일부이며, 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Nagase Takao, 1999, The Strength and maintenance of Welded Bogie structures, Yeon-Woo Co., pp. 201-202 (in Japanese)
- (2) Toshio Terasaki et al., 1987, Effect of welding residual stress on fatigue strength of welded joint, Vol.36, No. 410, Material, pp.1246-1252 (in Japanese)
- (3) 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
- (4) H.S. Bang, 1993, A Study on the mechanical Behavior of welded parts in thick plate during post welding heat treatment, Journal of KWS, Vol. 11, No. 4, pp. 103-111 (in Korean)
- (5) Roessle, M. L., Fatemi, A., 2000, Strain-controlled fatigue properties of steels and some simple approximations, International journal of fatigue, v.22 no.6, pp.495-511
- (6) R.I. Stephens et al., 2001, Metal Fatigue in Engineering, John Wiley & Sons, pp.328-329
- (7) S. Han, J. Han and B. Shin, 1998, Investigation of Fatigue strength and prediction of remaining Life in the Butt Welds containing Penetration Defects, Journal of KSSC, 10-3, pp.423-435 (in Korean)
- (8) T.R. Gurney, 1979, Fatigue of welded structures, Cambridge University Press, pp. 235-243
- (9) ASTM E837-92, Standard Test method for determining residual stresses by the hole-drilling strain-gage method