

국부가열을 이용한 면외거셋의 피로강도 향상 Improvement of Fatigue Strength by Spot Heating for Out-of-plane Gusset

정영화* 남왕현** 장동휘***
Jung, Young-Hwa Nam, Wang-Hyone Chang, Dong-Huy

Abstract

In the study, the fatigue strength improvement and mechanism have been estimated by the Spot-Heating treatment on welded bead toes. For this, web-gusset specimens were made without residual stresses and the others with residual stresses imposed by Spot-Heating.

The 4-point bending tests were performed in order to estimate the effect of spot-heating on fatigue strength and fatigue characteristics quantitatively for non load-carrying fillet welded joints subjected to pure bending.

As a result of fatigue test, fatigue strength of As-Welded specimen for non load-carrying fillet welded joints subjected to pure bending has satisfied the grade of fatigue prescribed in specifications of Korea, AASHTO and JSSC. As compare with As-Welded specimen and Spot-Heating specimen have increased about 20% for the fatigue strength at 7.7×10^6 cycles. The Spot-Heating by reformation of the residual stress on welded bead toes has greatly affected the fatigue crack propagation life, but has slightly affected the fatigue crack initiation life.

키워드 : 국부가열처리, 피로강도, 피로균열성장수명, 피로균열 발생수명, 잔류응력
Keywords : Spot Heating, Fatigue Strength, Fatigue Crack Propagation Life,
Fatigue Crack Initiation Life, Residual Stress

1. 서론

반복하중이 작용하는 강구조물에서는 하중반복 횟수가 증가함에 따라서 정적파괴하중보다 훨씬 낮은 하중에서 피로균열이 발생할 수 있다. 이러한 피로균열의 대부분은 용접이음부에서 발생하고 있으며, 특히 용접지단부에서 피로균열이 발생, 성장하는 것으로 보고되고 있다.[3],[9],[10],[12],[13],[14] 경량화가 요구되는 장대교의 건설에는 고강도강의 사용이 불가피하고, 고강도강의 용접이음에 대한 피로강도의 향상문제는 매우 중요하다.

구조용 강재의 모재는 강재의 강도의 증가에 따라 피로강도도 높아지는 재료 의존성을 보이고 있으나, 용접 이음부에서의 피로강도는 강재강도에 의존하지 않으며, 오히려 강재강도 증가에 역으로 피로강도가 저하하는 경향을 보이고 있다. 강재강도가 높아지면 균열감수성이 커지고, 또 용접이음부에서 발생하는 용접 잔류응력(welding residual stresses)이 증가한다. 그리고 용접에 의해 열이력을 받기 때문에 용접부와 그 주변의 열영향부(HAZ, heat affected zone)는 재질변화를 일으키며, 결국 피로균열의 발생을 용이하게 만든다. 고장력강은 연강보다 피로강도 의존성이 높아지므로 고강도강의 피로강도를 개선하거나 향상시키는 문제는 대단히 중요하다고 생각된다.

그러나 피로강도 향상에 대한 국내의 연구는 아직 미흡한 실정이며, 실교량에서 발생한 피로균열

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 대학원 토목공학과 박사과정
*** 강원대학교 대학원 토목공학과 석사과정

발생부에 대한 적용사례도 미흡한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 면외거셋을 대상으로 용접지단부를 국부가열 처리함으로써 용접지단부의 인장잔류응력의 감소에 따른 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일련의 실험 및 유한요소 해석을 실시하였다.

이 결과로부터 용접지단부의 두께방향에 대한 잔류응력의 변화정도, 피로균열발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하였으며, 다양한 용접이음부에 대한 피로강도 향상방안에 대해서 검토하고 향후 우리나라 고유의 강교량의 피로설계기준에 필요한 자료를 제시하고자 한다.

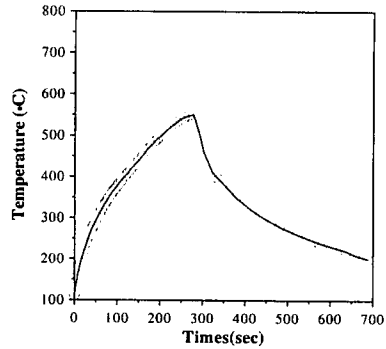


그림 1 가열처리시 온도분포

2. 실험

2.1 시험체 및 형상

이 연구에서 사용한 시험체는 용접구조용강재인 SM490B로써, 이에 대한 화학성분 및 기계적 성질은 표 1 및 표 2와 같다.

한편, 이 연구에서는 용접후처리를 실시하지 않은 시험체를 대상으로 용접지단부를 국부가열처리를 실시하였으며, 가열처리시 온도분포는 그림 1와 같다.

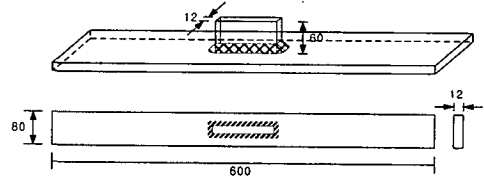


그림 2 시험체 형상 및 치수

표 1 화학성분

강종	화학성분				
	C	Si	Mn	P	S
SM490B	0.18	0.40	1.30	0.011	0.005

표 2 기계적 성질

강종	기계적 성질			
	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	연신율 (%)
SM490B	386.0	539.0	206.0	22

표 3 용접방법

시험체 종류	봉경 (mm)	전압 (volt)	전류 (amp)	속도 (cm/sec)
ASW	1.2	36~38	270~300	10~15

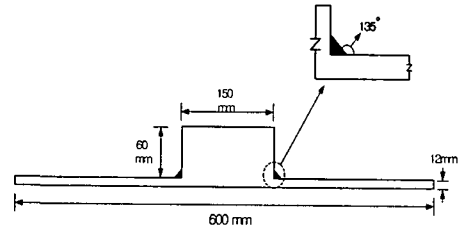


그림 3 시험체 용접모식도

2.2 실험방법

이 연구에서는 순수휨을 받는 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위해서 현재 강원대학교에서 보유하고 있는 ±25 ton 용량의 전기 유압식 피로 시험기(Shimadzu社)를 이용해서 그림 4와 같이 4점 휨피로실험을 실시하였으며, 피로실험시 작용하중은 일정진폭하중, 하중파형은 정현파를 이용하였으며, 하중재하속도

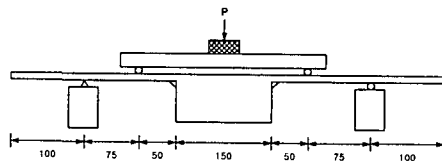


그림 4 피로실험방법

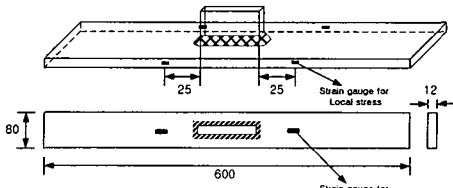


그림 5 변형률게이지 부착위치

는 5Hz, 응력비는 0.1로 하였다. 또한 용접지단부에서의 피로균열발생 및 성장특성을 정량적으로 평가하기 위해서 일정반복회수마다 비치마크를 도입하였으며, 각 시험체에서 피로균열발생점을 예상하고 유한요소해석 모델링시 용접지단부의 기하학적 형상에 관한 자료로 활용하기 위해서 인상계를 이용해서 용접지단부의 형상을 정량적으로 측정하였다. 한편, 그림 5에서와 같이 시험체에 작용하는 공칭응력과 용접지단부에서의 국부응력을 측정하기 위해서 변형률게이지를 부착하였다.

그림 6 용접잔류응력의 모재 두께 방향 분포를 산정하기 위해 이완 변형률의 측정을 행한 시험체의 모델이다. 모재의 용접지단부로부터 2mm 떨어진곳에 3층게이지를 부착한 후 용접지단부에서부터 약 5cm의 위치를 잘라내었다. 이 절단에 의해 부착한 변형률게이지에서는 거의 변형률의 변화가 측정되지 않았기 때문에 이 절단에 의한 잔류응력의 변화는 무시할 수 있다고 생각된다. 다음에 모재 두께 방향에 게이지로부터 3mm정도 떨어진부분을 두께 2mm씩 절단하며 변형률을 측정하였다. 특히 시험체를 절단할 때에는 절단에 의해 시험체가 고온으로 되지 않도록 주의를 기울여 가능한 한 천천히 절단하였다

그림 7은 잔류응력 측정결과이다. 측정결과에서 알수 있듯이 용접 지단부 중앙에서의 잔류응력 크기 차이가 두 배 이상 나는 것을 알 수 있다. 이로 부터 국부가열 처리가 피로강도 향상에 영향을 미칠 것으로 예측된다.

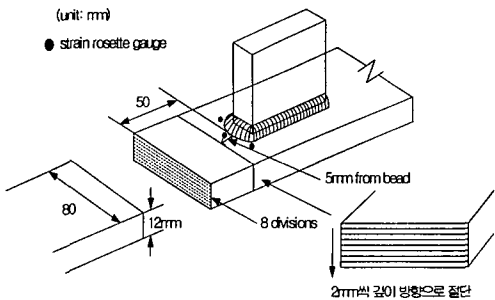


그림 6 용접잔류응력 측정

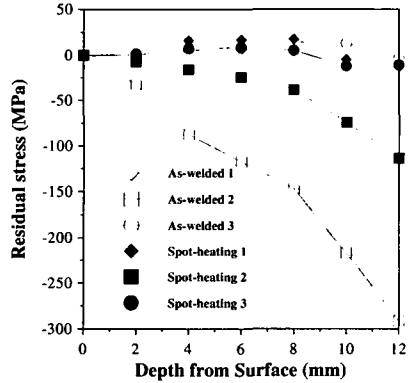


그림 7 잔류응력 측정결과

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로강도특성

순수험상태에서 면외거셋의 피로강도특성을 정량적으로 평가하기 위한 4점 휨 피로실험결과로부터 공칭응력범위와 반복회수사이의 관계를 나타내면 그림 8과 같다.

그림 8의 B등급과 C등급은 AASHTO,[1] D등급과 E등급은 JSSC[9]에서 규정하고 있는 하중비전달형 필렛용접부의 피로강도등급이며, 그림 중 실선 점선은 각각 AASHTO와 JSSC에서 규정하는 피로 설계곡선을 나타낸다.[1]

한편 그림 8에서 나타낸 결과로부터 회귀분석법을 이용해서 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계를 나타내면 표 4와 같다.

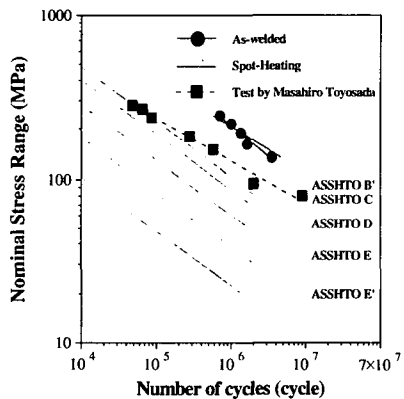


그림 8 공칭응력범위-반복회수 선도

표 4 공칭응력범위와 반복회수 사이의 관계식

시험체 종류	회귀분석식	2×10^6 회 피로강도 (MPa)	S-N선도 기울기
AW-SP	$\log(\Delta\sigma) + 0.38\log(N) = 8.36$	161	3.8
SH-SP	$\log(\Delta\sigma) + 0.28\log(N) = 9.25$	170	2.8

그림 8, 표 4에서 알 수 있는 바와 같이 순수힘을 받는 면외거셋에 대해 국부가열처리를 실시하지 않은 시험체의 피로강도는 도로교표준시방서와 AASHTO 및 JSSC에서 규정하고 있는 피로강도등급을 만족하고 있음을 알 수 있었다. 또한 AASHTO 및 JSSC에서 규정하는 피로설계곡선의 기울기 3보다 다소 급한 경향을 나타내고 있었다.

국부가열한 시험체는 고응력범위에서 JSSC에서 규정하는 D등급을 상향하며, 저응력범위에서는 D등급까지 되었음을 알 수 있었다. 그리고 AASHTO 및 JSSC에서 규정하는 피로설계곡선의 기울기 3보다 다소 완만한 경향을 나타내고 있었다. 이러한 경향은 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우보다 더욱 완만한 경향을 나타내고 있음으로써, 고주기피로에 접근함에 따라서 피로강도등급은 더욱 향상됨을 알 수 있었다. 이로부터 토목구조물과 같이 저주기 피로보다 고주기 피로에 큰 영향을 받는 경우, 국부가열 처리가 피로강도의 측면에서는 개선 효과가 있음을 알 수 있었다.

표 4에서 알 수 있는 바와 같이 순수힘을 받는 하중비전달형 필렛용접부에 대해서 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 2×10^6 회 피로강도는 161MPa이고 국부가열 처리한 시험체의 2×10^6 회 피로강도는 170MPa이며 용접지단부를 국부가열한 경우의 2×10^6 회 피로강도는 약 5.6% 증가하였다. 하지만 최근들어 본 시험체의 피로강도는 7.7×10^6 회까지 적용되고 있다. 따라서 7.7×10^6 회까지의 피로강도를 비교했을 때 약 20%상승된 것을 알 수 있었다.

3.2 정적변형률변화에 의한 피로특성

피로균열 발생상황을 조사하기 위하여 용접지단부로부터 17mm떨어진 부위에 변형률 게이지를 부착하여 일정반복횟수별로 정적변형률을 측정하였으며, 이를 정리하여 도식적으로 그림 3.2에서 나타냈다.

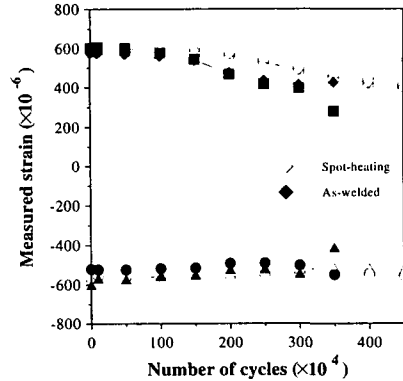


그림 9 변형률 변화 특성

그림 9에서 제시한 국부가열처리에 따른 시험체의 변형률 변화로부터 각 시험체의 피로균열 발생수명 N_i 는 거의 비슷한 반복횟수에서 발생하지만 균열성장수명을 볼 때 많은 차이가 남을 알 수 있다. 용접지단부를 가열처리한 시험체들이 가열처리를 실시하지 않은 시험체보다 피로균열 성장수명 N_p 가 개선 됨을 알 수 있었다. 이는 용접지단부의 spot heating처리에 의해 압축잔류응력이 도입 됨으로 인한 피로균열성장수명이 증가된 현상에 기인된 것으로, 잔류응력이 피로균열 성장수명에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다. 따라서 국부가열처리는 피로강도 개선에 효과가 있음이 증명 되었다.

한편그림 9은 피로균열발생수명 N_i 는 용접후처리를 실시한 시험체의 피로균열발생수명 N_i 가 피로균열성장수명 N_p 에 비해 크게 개선되지 않았음을 알 수 있었다. 이와같은 결과는 국부가열에 의한 후처리 방법은 지단부의 압축잔류응력 도입으로 인한 피로균열성장수명에는 크게 영향을 미치지지만, 피로균열발생수명에는 영향을 줄 수 있었다. 따라서 피로균열성장수명의 개선에 대한 처리방법으로 그라인딩처리와 같은 용접지단부 형상개선 도입이 필요하다 할 수 있으며, 피로균열발생수명과 피로균열성장수명을 모두 증진시키는 개선방법에 대한 연구가 필요하다고 사료된다.

3.3 파단면 특성

순수힘을 받는 면외거셋의 피로균열발생 및 성장특성을 조사하기 위해서 대상 시험체에 대해서 피로실험을 종료한 후의 파단면 형상 및 파단면 모식도를 그림 10과 그림 11에 나타내었다.

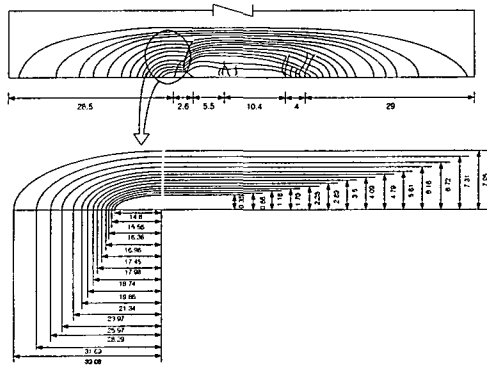
그림 10과 그림 11에서 알 수 있는 바와 같이 용접지단부의 응력집중계수가 큰 여러 부분에서 피로균열이 다발적으로 발생해서 반타원형상으로 판

폭, 판두께 방향으로 성장하다가 인접한 동일한 형태의 피로균열과 합체되어 보다 큰 형상의 반타원형 균열로 성장해서 파단에 이르는 것을 확인할 수 있었다.

그림 10과 그림 11은 각 시험체의 지단부 형상에 따른 피로균열 발생점을 나타낸 것으로써, 비드접선각도나 지단부 곡률반경이 피로 균열발생에 영향인자임을 확인할 수 있었다.



그림 10 피로실험결과에 따른 파단면 사진



$$\Delta \sigma_{\max} = 266.7 \text{ MPa} \quad \Delta \sigma_{\min} = 26.7 \text{ MPa}$$

$$\Delta \sigma = 240 \text{ MPa} \quad N_f = 419,940 \text{ (cycles)} \quad R = 0.1$$

그림 11 피로실험결과에 따른 파단면 모식도

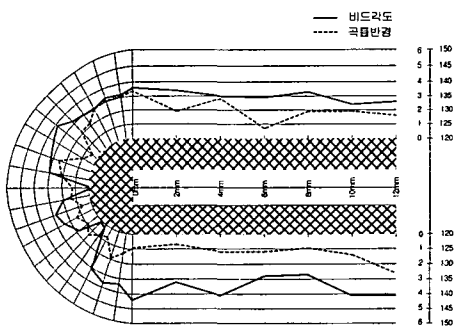


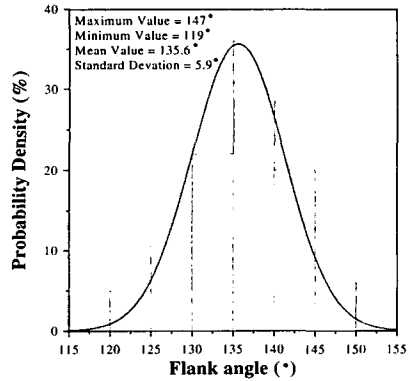
그림 12 비드접선각도와 곡률반경 분포

비치마크를 도입한 시험체에 용접지단부 형상의 차이에 따라 피로균열은 비드접선각도와 곡률반경이 변수로 작용하여 응력집중이 큰 곳에서 발생하였다. 즉, 이의 결과로부터 피로균열은 비드접선각도와 곡률반경이 작은 부위에서 응력집중이 상대적으로 크게 나타나며 이것이 균열의 발생할 확률이 높음을 알 수 있었다.

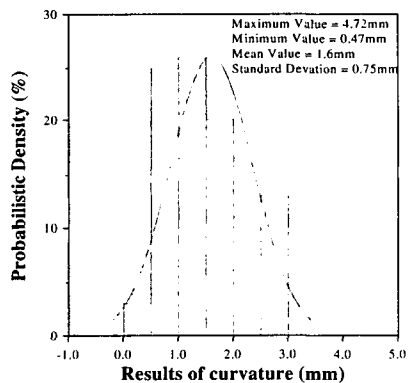
3.4 유한요소해석

유한요소해석시 용접지단부의 기하학적 형상을 정확하게 고려하기 위해서 비드형상을 측정하여 그 평균값을 이용하였으며, 용접비드형상에 대한 분포특성을 나타내면 그림 13과 같다.

그림 13에서 나타낸 바와 같이 비치마크 시험체에 대한 필렛용접부의 비드접선각도와 곡률반경을 측정한 결과, 비드접선각도의 평균값은 135.6°, 표준편차는 5.87°이며 곡률반경의 평균값은 1.6mm, 표준편차는 0.75mm임을 알 수 있었다.



(a) 비드접선각도



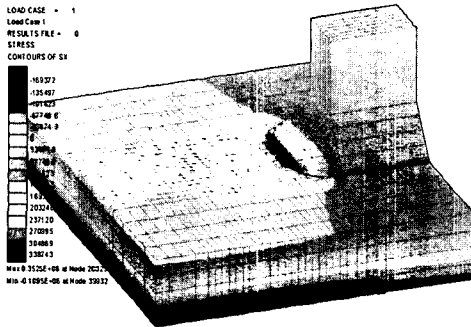
(b) 곡률반경

그림 13 용접지단부의 형상측정 결과

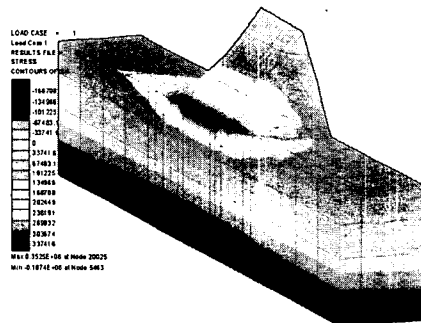
면외거셋형 시험체의 형상에 따른 용접지단부의 응력집중계수를 산정하고 이로부터 응력구배 보정계수(F_g)를 계산하기 위하여 유한요소해석을 통한 선형해석을 실시하였다.

해석프로그램은 범용유한요소해석 프로그램 LUSAS[Lundon University Stress Analysis System, Ver 13.2, 2000]를 사용하여 입체요소(3D Continuum Element)인 PN6, HX8요소를 사용하였으며, 용접지단부의 곡률반경은 측정값의 평균인 0.1m로 곡률로 처리하여 모델링하였다. [4]

대상 시험체의 단위하중을 작용시킨 경우의 유한요소해석 결과의 일례를 나타내면 그림 14와 같다. 한편 본 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위해서 해석결과로부터 용접지단부로부터의 거리에 따른 응력집중계수(실제응력/공칭응력)의 변화 정도를 나타내면 그림 15와 같다.



(a) 거리에 따른 응력분포



(b) 두께 방향의 응력 분포

그림 14 한요소해석결과의 일례

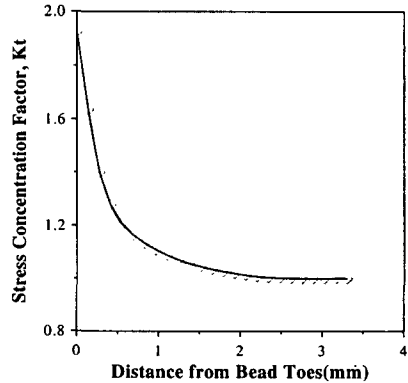


그림 15 용접지단부로부터 응력집중계수의 변화

그림 15에서와 같이 최대응력은 용접지단부에서 발생하였으며, 그림 12에 나타난 피로균열 발생위치가 유한요소해석결과의 최대응력 발생위치와 일치하는 것을 알 수 있었다.

4. 파괴역학적해석

4.1 응력확대계수범위

중양부에 길이가 $2a$ 인 판통균열을 갖는 무한판에 등분포응력 $\Delta\sigma$ 가 작용할 때 응력확대계수범위 ΔK 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = \Delta\sigma\sqrt{\pi a} \quad (1)$$

실제 구조물은 이상적인 구조물과는 달리 반드시 결함을 포함하며, 결함의 형상이나 결함이 존재하는 부재의 형상을 고려함으로써 일반적인 경우의 응력확대계수범위는 식 (1)에서 균열에 대한 보정계수 $F(a)$ 를 고려해서 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta K = F(a)\Delta\sigma\sqrt{\pi a}$$

$$F(a) = F_e F_s F_w F_g \quad (2)$$

여기서, F_e 는 균열형상에 대한 균열형상보정계수, F_s 는 표면균열에 대한 자유표면보정계수, F_w 는 유한판폭, 판두께에 대한 유한판보정계수, F_g 는 응력집중의 영향을 고려한 기하학적 형상보정계수이다.

(1) 표면균열에 대한 보정계수

H.Tada, P.C.Paris 및 G.R.Irwin은 등분포 응력을 받는 반무한판에 존재하는 반타원형 균열의 균열길이방향 선단에서의 자유표면보정계수를 식 (3)

과 같이 정의하고 있다.[2]

$$F_s = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{c} \right) \quad (3)$$

여기서, a : 반타원균열의 짧은지름, c : 반타원 균열의 긴지름이다.

(2) 균열형상에 대한 보정계수

S.J.Maddox는 무한체 내부에 매립된 타원형 균열의 균열개구변위에 대한 해를 이용해서 균열형상보정계수를 식 (4)와 같이 정의하고 있다.[7]

$$F_e = \frac{1}{E(k)} (1 - k^2 \cos^2 \theta)^{\frac{1}{4}} \quad (4)$$

여기서, $E(k) = \int_0^{\frac{\pi}{2}} (1 - k^2 \sin^2 \theta)^{\frac{1}{2}} d\theta$

$$k^2 = 1 - \left(\frac{a}{c} \right)^2, \quad \theta : \text{위상각이다.}$$

(3) 유한판폭에 대한 보정계수

유한판두께 또는 유한판폭의 중앙에 길이 $2a$ 인 관통균열에 대한 유한판보정계수는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_w = (1 - 0.025 \lambda^2 + 0.06 \lambda^4) \sqrt{\sec \left(\frac{\pi \lambda}{2} \right)} \quad (5)$$

여기서, $\lambda = a/t$ 이다.

(4) 응력구배에 대한 보정계수

P.Albrecht 등은 용접지단부에서의 응력집중계수에 대한 회귀분석결과로부터 기하학적 형상보정계수를 식 (6)을 이용해서 산정할 수 있다고 보고하였다.[5]

$$F_g = \frac{2}{\pi} \int_0^a \frac{K_x}{\sqrt{a^2 - x^2}} dx \quad (6)$$

여기서, K_x 는 응력집중계수에 대한 다항식이다.

식 (6)을 이용해서 기하학적 형상보정계수를 산정하기 위해서는 응력집중계수를 거리 x 에 대한 다항식의 형태로 나타내는 것이 편리하다.

따라서, 그림 4.3에서 나타난 해석결과에서 응력집중계수를 거리 x 에 대한 다항식의 형태로 나타내면 식 (7)과 같으며, 식 (6)을 이용해서 기하학적 형상보정계수를 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\frac{K_x}{(K_0)_{x=0}} = 1 + Ax + Bx^2 + Cx^3 + Dx^4 + \dots \quad (7)$$

$$\frac{F_g}{(K_0)_{x=0}} = 1 + \frac{2A}{\pi} a + \frac{B}{2} a^2 + \frac{4C}{3\pi} a^3 + \dots \quad (8)$$

4.2 응력 확대계수범위 산정

앞에서 설명한 내용에 기초해서 본 연구에서는 면외거셋 시험체를 대상으로 용접지단부를 가열을 하지 않은 시험체에 대해서 유한요소해석결과로부터 산정한 용접지단부에서 7차 다항식을 이용한 회귀분석결과에 기초해서 그림16에서 나타난 바와 같이 기하학적 형상보정계수를 산정하였으며, 그림의 x축에서 나타난 상대깊이(a/t)는 전체두께에 대한 균열깊이의 비를 나타낸다.

그림. 16에서 알 수 있는 바와 같이 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 기하학적 형상보정계수의 최대값은 1.9 으로 나타났다.

한편 이 논문에서 사용한 면외거셋을 대상으로 용접지단부 후처리에 따른 피로균열성장특성을 정량적으로 평가하고, 파괴역학적 해석을 실시하기 위해서 앞에서 설명한 일련의 균열보정계수 $F(a)$ 를 산정한 결과를 나타내면 그림 17와 같다.

여기에서 알 수 있는 바와 같이 용접후처리를 실시하지 않은 시험체와 후처리한 시험체에 대해서 산정한 균열보정계수 중 균열형상보정계수 (F_e), 자유표면보정계수(F_s) 및 유한판보정계수 (F_w)는 균열깊이가 증가함에 관계없이 일정한 값을 나타내고 있으나, 기하학적 형상보정계수(F_g)는 균열깊이가 증가함에 따라서 급격하게 감소하는 경향을 나타냄으로써 상대깊이가 0.3이하인 경우에 기하학적 형상보정계수가 균열보정계수에 가장 지배적인 인자임을 알 수 있다.

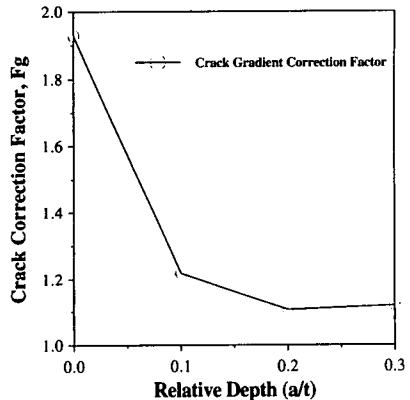


그림 16 기하학적 형상보정계수

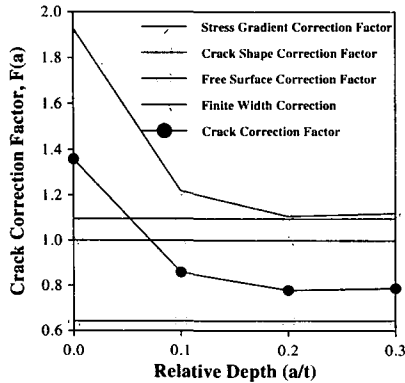


그림 17 균열보정계수

균열보정계수 산정 결과로부터 용접후처리를 실시하지 않은 시험체에 대한 균열깊이에 따른 균열보정계수에 대한 회귀분석결과를 다항식의 형태로써 나타내면 식 (9)과 같다.

$$F(a) = 1.36 - 8.22\left(\frac{a}{t}\right) + 37.70\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 55.51\left(\frac{a}{t}\right)^3 \quad (9)$$

여기서, 균열보정계수에 대한 다항식의 a/t 는 상대깊이 이고 $a/t \leq 0.3$ 즉, 균열깊이가 시험체 두께의 0.3 이하인 경우에만 유효하다.

그림 17과 식 (9) 에서 나타낸 균열보정계수에 대한 결과를 이용해서 파괴역학적 해석을 실시하기 위해 비치마크실험결과를 이용해서 $a-N$ 선도를 나타내면 그림.18과 같다.

그림. 18에서 나타낸 반복회수별 균열길이는 비치마크실험으로부터 얻은 반타원형의 표면균열을 대상으로 판두께방향 즉, 단축방향의 균열길이를

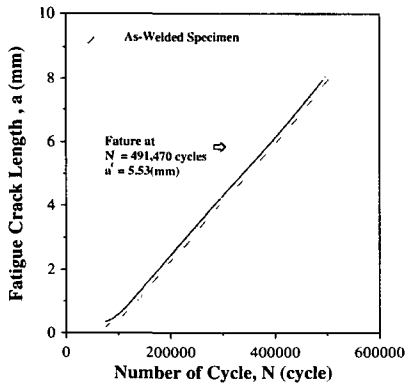


그림 18 a-N 선도

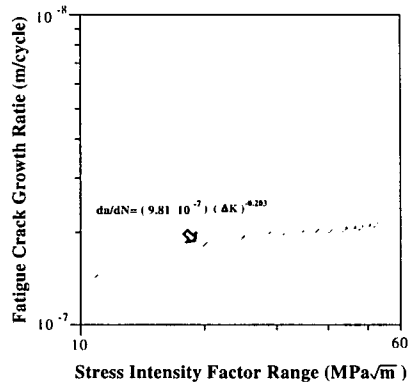


그림 19 피로균열성장곡 과 응력집중계수

산정하였으며, 그림. 18의 결과로부터 7점법을 이용해서 산정한 피로균열성장속도와 응력확대계수 범위 사이의 관계를 나타내면 그림. 19와 같다. 한편 그림. 19에서 나타낸 응력확대계수범위는 식 (9) 시험체에 대한 균열보정계수에 대한 결과를 이용해서 산정한 결과이며, 응력확대계수범위에 대한 식을 나타내면 식 (10) 와 같다.

$$\Delta K = \left\{ 1.36 - 8.22\left(\frac{a}{t}\right) + 37.70\left(\frac{a}{t}\right)^2 - 55.51\left(\frac{a}{t}\right)^3 \right\} \Delta \sigma \sqrt{\pi a} \quad (10)$$

그림. 19에서 나타낸 바와 같이 각 시험체별로 피로실험시 도입한 비치마크 시험결과로부터 7점법을 이용해서 산정한 피로균열성장속도와 유한 요소해석으로부터 구한 응력확대계수범위 사이의 관계로부터 선형회귀분석법을 이용해서 재료상수 C , m 을 산정한 결과, 용접후처리를 실시하지 않은 시험체의 경우 $C=9.81 \times 10^{-11}$, $m=0.2$ 임을 알 수 있었다.

한편 용접후처리를 실시하지 않은 시험체에 대해서 기존 연구자들이 제안한 재료상수인 C , m 값을 비교하면 Barsom[1987]은 식에서 나타낸 바와 같이 $C=4.8 \times 10^{-12}$, $m=3.0$ 으로 제안하고 있으며, JSSC 피로설계지침[1993]은 평균설계곡선에서 $C=2.7 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, 최안전설계곡선에서 $C=1.5 \times 10^{-11}$, $m=2.75$ 로 제안하고 있다. 또한 Maddox[1975]는 314 MPa급 강재에 대해서 $C=2.57 \times 10^{-11}$, $m=3.2$ 로 제안하고 있다.[7]

이의 결과로부터 이 논문에서 사용한 시험체의 파괴역학적 해석으로부터 산정한 재료상수 C , m 값이 기존연구결과에서 제안된 값보다 다소 하회하는 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

한편 그림. 18에서 나타낸 피로균열성장속도

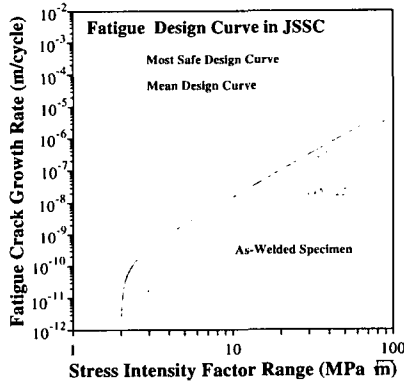


그림 20 JSSC 평균설계곡선과의 비교

와 응력확대계수범위 사이의 관계를 JSSC 피로 설계지침에서 제안하고 있는 최안전설계곡선 및 평균설계곡선과 비교해서 나타내면 그림. 20과 같다. 그림. 20에 나타난 바와 같이 이 논문에서 대상으로 한 면외거셋 시험체의 용접후처리를 실시하지 않은 시험체에 대한 파괴역학적 해석결과는 JSSC 피로설계지침에서 제안하고 있는 평균설계곡선과 거의 유사한 경향을 나타내고 있으나 전반적으로 하회하는 경향을 나타냄으로써 안전측으로 평가되었다.

또한 후처리한 시험체의 경우에도 JSSC의 평균설계곡선에 하회하는 경향을 나타내고 있으며, 기울기 또한 완만한 경향을 나타내고 있었다.

4. 3 유한요소해석 결과와의 비교

4.2절에서 산정한 C, m을 식(11)에 적용하여 피로 수명을 산출하면 표 5와 같다.

$$N_p = \int_{a_i}^{a_f} \frac{1}{C(\Delta k^m - \Delta K_{th}^m)} da \quad (11)$$

여기서, a_i : 초기 균열길이(mm), a_f : 한계균열길이(mm)

여기서 초기균열길이 a_i 는 0.25mm로 가정하였으며, 한계균열길이 a_f 는 시험체 전체 단면 중에서 휨하중에 의해서 인장응력만이 작용하는 한계값인 0.45T(5.4mm)로 가정하였다.

표 5에서 알 수 있는 바와 같이 계산결과가 실험결과 보다 과대평가되고 있는 경향을 나타내고 있었다. 이와 같은 실험결과와 계산결과와의 차이는 비치마크 실험으로부터 측정된 피로균열 길이의 정확도와 시험체에 용접 열 영향으로 인한 각 변형이 존재함으로써, 용접지단부의 오목한 부분에서 면외 휨 인장응력이 추가적으로 작용하고, 용접지단부의 비드형상 측정 결과 값이 평균치 사용에 따른 과소평가 된 결과 값의 적용에 기인

한 것으로 사료된다.

표 5 계산피로수명과의 비교

시험체 종류	응력범위 (Mpa)	실험피로 수명 (cycles)	계산피로 수명 (cycles)	수명비
As-welded	242	713528	1372349	1.92
	215	1016147	1737441	1.71
	188	1361370	2270500	1.67
	161	1651932	3093011	1.87
	134	3526470	4460107	1.26
	107	7700000	6985557	0.91

5. 결론

하중비전달형 필렛융접부를 가열처리한 것 과 가열처리하지 않은 2종류의 변수로 일련의 피로 실험 및 해석을 수행하였고, 이로부터 피로강도 향상과 피로특성에 대한 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 가열처리에 의한 잔류응력 생성 메커니즘에 따른 인장잔류응력을 감소시킴으로서 피로균열 진전 속도를 느리게 할 수 있었으며, 이에 따라 피로균열 성장수명을 연장할 수 있었다. 하지만 변형률 특성을 비교한 결과에서 알 수 있듯이 피로균열 발생수명에는 영향이 작게 나타남을 알 수 있었다.

2. 용접지단부를 가열처리함에 따라 2×10^6 회 에 대한 피로강도는 고응력 범위에서는 효과가 없지만 저응력 범위에서 개선효과가 있음을 확인하였다. 그리고 7.7×10^6 의 피로강도에서는 약 20%상승되는것을 알 수 있었다. 또한 피로강도는 현행 도로교 표준시방서의 피로설계기준과 JSSC 및 AASHTO에서 규정하고 있는 피로강도등급을 만족하고 있음을 알 수 있었다.

3. 향후 연구과제로는 더 큰 압축잔류응력 도입과 현장적용을 위한 최적의 온도와 가열시간을 도출해 내는 연구가 필요하다고 사료된다. 또한 피로균열이 발생된 부분을 파단면 사진과 형상측정결과와 비교하였을때 용접지단부의 비드접선각도와 곡률반경이 가장 큰 영향인자임을 확인하였다. 따라서, 비드접선각도의 완화와 곡률반경의 증가를 통해 피로균열발생수명을 연장할 수 있는 그라인딩 처리나 TIG 처리와 병행시 더 좋은 효과를 보일 것이라 사료된다.

참고 문헌

- [1] AASHTO, "Standard Specification for Highway Bridges", pp.144-147, 1996.
- [2] H.Tada, P.C.Paris and G.R.Irwin, "The Stress Analysis of Crack Handbook", Del Research Corp., Hellertown, 1973.
- [3] J.W.Fisher, "Fatigue and Fracture in Steel Bridges", John Wiley & Sons, 1984.
- [4] LUSAS, "Lusas Theory Manual et al", Ver.13.1, FEA Korea Ltd, 2000.
- [5] P.Albrecht, K. Yamada, "Rapid Calculation of Stress Intensity Factors", Journal of the Structural Division, Proceedings of the ASCE., Vol.103, No.ST2. pp.377- 389, 1977.
- [6] P.C.Paris, F.Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", Trans. of ASME, Series-D, Vol.85, No.4, pp.528-533, 1963.
- [7] S.J.Maddox, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", International Jr. of Fracture Mechanics, Vol.11, No.2, pp.221, 1975.
- [8] S.T.Rolfe, J.M.Barsom, "Fracture and Fatigue Control in Structures-Application of Fracture Mechanics", Prentice-Hall pp.425-454, 1977.
- [9] 日本土木學會編, "鋼橋における劣化現象と損傷の評價", (株)丸善, pp.10-12, 1996.
- [10] 後川 理, 中山英治, "溶接継手部の應力集中係數", 石川島播磨技報, 第23卷, 第4號, 1983.
- [11] 건설교통부, "도로교표준시방서 - 설계, 시공 및 유지관리편", pp.119-122, 1996.
- [12] 김동준, "그라인딩 처리에 따른 하중비전달형 필렛용접부의 피로특성", 한양대학교 대학원 석사학위논문, pp.29-30, 2000.
- [13] 임정권, 박문호, 장준호, "필렛용접이음부의 후처리에 따른 피로강도 향상메카니즘의 연구", 한국강구조학회논문집, 제11권, 제3호, 1999.
- [14] 정영화, 홍성욱, 김익겸, 정진석, "강판형의 덮개판 형상에 따른 피로특성", 한국강구조학회 논문집, 제12권, 제2호, 2000.