

용접 토우부의 국부적 변형을 측정을 통한 용접부의 정적 과하중에 따른 피로강도의 변화 평가

이현우*, 김주환**, 김현재***

The Static Overload Effect Estimations on Fatigue Strength by The Measurement of Local Strain Variation at The Weldment Toe

Hyun-Woo Lee*, Ju-Hwan Kim**, Hyun-Jae Kim***

ABSTRACT

Fatigue strength of the welding structure is governed by the residual stress at the weldment toe and static tensile overloads were known as relieving the residual stresses. In this study, static tensile overloads were applied to the welding structures which caused the relief of residual stresses. The amount of residual stress relief was found as proportional to the change of fatigue limit at the given conditions. Based on the fact of the proportionality between the change of fatigue limit and that of residual stress, simple measurement technique is proposed. Modified stress-life curves based on proposed technique gave good agreement with test results.

Key Words : Overload effect(과하중 효과), Mean strain(평균 변형률), Welding notch factor(용접노치계수), Residual stress(잔류응력), Fatigue strength(피로강도)

1. 서론

해양, 선박 및 굴삭기 등과 같은 구조물에서 가장 널리 사용되고 있는 조립 방법은 용접에 의한 방법이다. 용접 구조물은 형상에 따라 서로 다른 형태의 용접구조를 갖게 되며 독자적인 용접 구조물에 대한 피로강도를 고려한 설계 자료를 확보하기 위해서는 용접 형태에 따른 많은 실험 데이터의 확보가 필요하다. 용접 구조물에서 균열의 발생은 용접 토우부 부근의 국부적인(local) 응력, 변형률

장에 의하여 지배된다⁽¹⁻²⁾. 특히, 초기 균열의 주된 발생 장소인 용접 토우부 부근은 이미 항복에 준하는 용접 잔류응력을 받고 있어서 약간의 부가적인 하중 만 가해져도 토우부 부근에서 소성변형을 일으켜 초기 용접 잔류응력이 감소하게 된다⁽³⁻⁵⁾. 용접 잔류응력의 감소는 용접 토우부 부근의 평균응력을 감소시키는 결과를 가져와 피로강도가 개선되는 결과를 가져오게 된다. 이와 관련하여 인위적으로 용접 토우부 부근에 하중을 가하여 용접부의 피

2000년 11월 15일 접수

* 부산대학교 기계기술연구소(정회원)

** (주)현대 중공업, 부산대학교 대학원

*** 부산대학교 기계설계공학과 박사과정

로 강도를 개선하려는 연구가 활발히 진행되고 있다¹⁶⁻¹⁹⁾. 그러나 용접 구조물의 피로거동의 복잡성(구조물의 구조, 용접의 순서, 용접 비이드의 모양, 제작 과정이나 여러 가지의 시험과정에서 가해진 하중에 의하여 변동)으로 인하여 용접 구조물의 피로특성을 정량적으로 구명한 연구결과는 찾아 보기 힘들다. 지금까지 용접부의 피로특성을 고려한 설계 표준들이 제시되어 용접 구조물의 설계에 적용¹¹⁻¹²⁾되고는 있으나 수많은 용접구조와 조건으로 인하여 설계 기법의 표준화에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히, 정상 운전을 시작하기 이전에 가해진 하중에 의한 용접 잔류응력의 변화는 그 다양성으로 인하여 정량적으로 파악하여 구조물의 설계에 반영하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 용접 구조물의 용접구조의 형태에 따른 특성과 가해지는 하중(과하중, 하중비)의 효과를 표준화하는 방법을 다음과 같이 제시하였다.

용접부의 피로특성은 용접 접합의 형태에 따라 다르게 나타나고 있으나 결과적으로는 토우부 부근의 국부적 응력에 의하여 지배되고, 따라서 용접 잔류응력의 영향이 가장 크다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 용접 토우부 부근에 걸리는 용접 잔류응력을 평균응력으로 가정하여 피로수명 선도를 보정하는 방법으로 적은 수량의 시편으로 여러 가지의 하중 조건하에서의 피로수명 선도를 획득하는 기법을 제안하였다. 또한, 용접 토우부의 용접 직후의 용접 잔류응력의 크기는 모재의 항복응력과 같다고 가정하여 하중비가 R=-1인 조건에서의 피로수명 시험으로 다른 하중 비에서의 피로수명을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. 본 연구에서는 대표적인 용접 구조 중의 하나인 필렛(Fillet) 용접구조에 대하여 제시된 기법을 적용하고 용접부 피로특성 표준화 기법의 타당성을 검토하였다.

2. 이론

2.1 응력-변형률 관계식

인장 시험 결과로부터 응력과 변형률의 일반적인 관계식¹³⁾을 다음의 식 (1)과 같이 얻을 수 있다.

$$\epsilon_t = \frac{\sigma}{E} + \left(\frac{\sigma}{K}\right)^n \quad (1)$$

단 여기서, σ 는 가해진 응력, ϵ_t 는 가해진 변형률, E는 종탄성계수(206 GPa), K는 강성계수(strength coefficient, 1100MPa), n은 강성지수(strength exponent, 0.1315)이다.

본 연구에 사용된 용접 모재는 Mild steel로써 항복강도가 310 Mpa이다. 용접 토우부 부근에서는 용접시의 열 영향으로 인하여 국부적인 용융이 일어나게 된다. 용융 후 접촉 열전달에 의하여 용융부가 급속히 냉각되게 되는데 이때 토우부 부근이 모재에 비하여 경화되며, 이때의 열 수축으로 인하여 인장 잔류 응력이 발생한다. 이때, 용접 토우부 부근의 항복강도는 Meyer hardness 측정 결과에 근거하여 환산하면 450MPa이 된다. 그러므로 용접부의 응력/변형률 관계식은 식(1) 보다는 동일한 변형률 크기에 대하여 더 큰 응력 수준을 나타낼 것으로 판단된다.

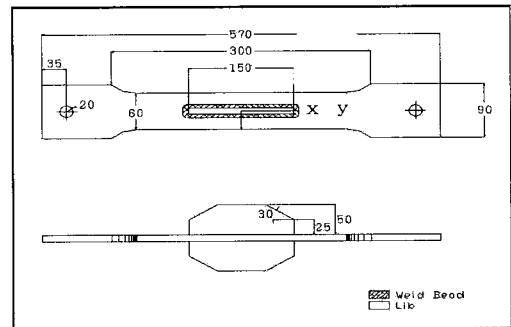


Fig. 1 Nonload Carrying Fillet Weldment Specimen

2.2 용접 토우부 부근의 응력/변형률 상태

용접구조물에 외력이 가해지면 용접 토우부는 용접시 생성된 항복에 준하는 용접 잔류응력으로 인하여 즉시 항복을 일으키며 용접 토우부 부근의 응력/변형률 상태가 변동하게 된다. 그러므로 용접부의 응력/변형률 상태를 파악하기가 매우 어렵다. 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 용접 시험편에 용접 토우부 X와 용접부에서 멀리 떨어진 위치인 Y에 스트레인 게이지를 부착하여 다음과 같이 응력/변형률 상태를 해석하였다. 초기 인장 하중을 P_p 만큼 가하게 되면, 용접 토우부 부근의 응력/변형률 상태는 Fig. 2의 A의 상태에서 B의 상태로 변화하게 된다. 여기서 다시 하중을 제거하면 용접토우부 부근의 응력/변형률 상태는 C로 이동하게 되는데

이때, 용접 토우부 부근은 소성변형을 일으킴으로 인하여 다음 식 (2)와 같이 용접 잔류응력, σ_{ref} 이 해소된다.

$$\sigma_{ref} = \sigma_{res} - \sigma_{unload} \quad (2)$$

여기서, σ_{res} 은 초기의 잔류응력이고 σ_{unload} 는 과하중을 제거한 후에 남은 잔류응력이다.

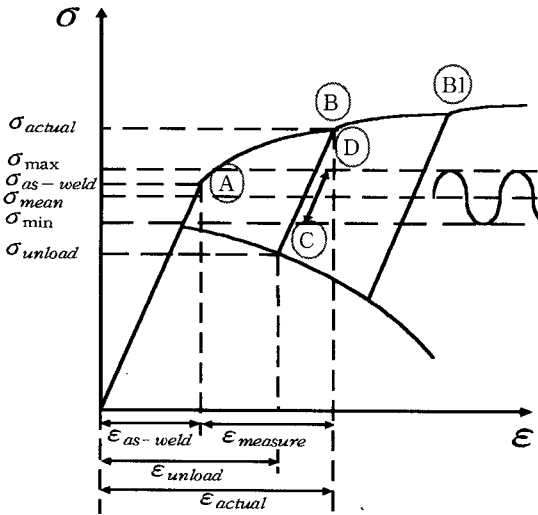


Fig. 2 Stress-Strain Relationship near the weldment toe

Fig. 2 의 D와 같은 반복응력을 가하는 경우 용접 토우부의 최대응력, 최소응력, 평균응력은 각각 다음의 식(3), (4), (5)와 같이 주어진다.

$$\sigma_{max} = (\sigma_p - \sigma_{unload}) \cdot \frac{P_{max}}{P_p} + \sigma_{unload} \quad (3)$$

$$\sigma_{min} = (\sigma_p - \sigma_{unload}) \cdot \frac{P_{min}}{P_p} + \sigma_{unload} \quad (4)$$

$$\sigma_{mean} = (\sigma_p - \sigma_{unload}) \cdot \frac{P_{mean}}{P_p} + \sigma_{unload} \quad (5)$$

여기서, σ_p 는 하중 P_p 가 가해질 때의 용접 토우부의 응력, σ_{unload} 는 외부하중을 제거했을 때의 용접 토우부의 응력이다. 단, $P_p \geq P_{max}$ 이다. 만일, $P_p < P_{max}$ 이면 용접 토우부가 다시 항복을 일으키면서 Fig. 2의 (B1)의 상태로 이동하게 되어 용접 잔류응력이 추가로 해소되며 용접 토우부 부근의 응력/변형을 관계가 달라지게 된다.

용접 구조물은 많은 경우에 사용하기 이전에 제작 상태의 검사 등의 용도로 예비적으로 정적/동적 하중에 의한 시험을 수행하게 되며 이때 가해진 외부하중은 용접 토우부의 용접 잔류응력을 감소시켜 피로강도의 개선을 가져오게 된다. 이 경우 가해진 정적 하중과 평균 하중에 따라 용접 토우부 부근의 실제 평균응력은 식(5)와 같이 저의 된다. 따라서 식 (5)로 정의된 평균 응력이 가해진 경우의 피로한도 S_{oe} 와 가해지지 않은 경우의 피로한도 S_e 의 차는 다음 식 (6)과 같이 주어진다.

$$\Delta S_e = S_{oe} - S_e \quad (6)$$

여기서, 피로한도의 차와 용접토우부가 받는 실제 평균응력의 비는 식(7)과 같이 주어지며 본 연구에서는 이 비를 용접노치계수로 정의하였다.

$$K_w = \frac{\Delta S_e}{\sigma_{mean}} \quad (7)$$

본 연구에서 사용된 Mild steel의 비전달 방식의 굽도리 필렛용접(Nonload carrying fillet weldment)에서의 용접노치계수, K_w 는 1.0으로 나타났다.

과하중에 의한 용접 토우부 부근에 실제 평균응력의 효과를 고려하여 수정된 응력-수명의 관계는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$\sigma_a - K_w \sigma_{mean} = \sigma'_f N_f^b \quad (8)$$

여기서, σ'_f 와 b 는 각각 피로강도계수와 지수이다 (fatigue strength coefficient and exponent)이다.

3. 실험 및 결과 고찰

3.1 실험

3.1.1 시험편

실험에 사용한 시험편은 선박 구조용 Mild Steel 'grade A'로 하중 비전달 방식의 굽돌이 필렛용접 형태로 제작하였으며 재료의 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1에 나타냈으며, 시험편의 형상 및 치수는 Fig. 1과 같다. 주판 및 필렛의 두께는 11.0mm로 동일하고, 용접 비드의 각 장은 4.5mm를 기준으로 하였다. 시험편의 용접조건은 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition(wt%) and mechanical properties of material

Material	C	Si	Mn	P	S	Ceq
Mild Steel	0.13 ~ 0.2	0.1 ~ 0.19	0.51 ~ 0.79	0.008 ~ 0.025	0.003 ~ 0.007	0.25 ~ 0.29
	Yield strength (MPa)		Ultimate strength (MPa)		Elongation (%)	
	Design	Actual				
	235	290 ~ 333	427 ~ 457		26 ~ 34	

Table 2 Welding condition

Current	Voltage	Speed	Method
220A	26V	50cm/min (=8.33mm/sec)	Semi-automatic CO ₂

3.1.2 실험장치

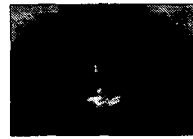
피로시험을 위한 하중조건은 Table 3과 같이 정하였다. 피로시험은 용량 20ton의 폐쇄 유압식 피로 시험기(Instron 1332)를 사용하여 Sine wave를 갖는 일정진폭의 반복하중을 가하여 수행하였다. 실험에 사용된 하중의 주파수는 10~20 Hz로 하였다.

Table 3 The loading conditions for fatigue test

하중 조건	1	2	3	4	5
Over load	0% σ_y (as-welded)	50% σ_y	85% σ_y	85% σ_y	85% σ_y
Mean stress (MPa)	0	0	0	50% σ_y (=117.50)	85% σ_y (=199.75)

3.1.3 용접 잔류응력의 측정

잔류 응력 측정을 위한 게이지의 위치는 Fig. 1과 같이 각 시편당의 4개소의 토우부에서 각각 2mm 떨어진 위치에 변형률 게이지(strain gage, 길이 1mm, 3축, KYOWA(日), KFG-1-120-D17-11)를 부착한 후 변형률 게이지로 부터 2mm의 간격을 두고 주위를 폭4mm, 깊이 4mm로 엔드밀(end mill)을 이용하여 게이지 주위의 재료를 제거하고, 제거 전후의 변형률의 변화량을 이동식 변형률 측정기(portable strainmeter)로 측정한 후 이를 응력으로 환산하여 잔류 응력을 구하였다(Sectioning method). 이 때 게이지에 영향을 줄 수 있을 정도의 열이 발생하지 않도록 엔드밀의 회전속도는 150rpm, 이동 속도는 약 0.093mm/sec로 하였다. Fig. 3은 잔류 응력의 측정방법을 나타낸 것이다. Table 4에 잔류 응력의 측정 결과를 나타내었다.



a : gage 부착전



b : gage 부착후



c : gage의 방식 및 보호



d : gusset을 제거한 후



e : gage 주위를 제거한 후

Fig. 3 Measurement of Residual Stresses by using Section Method

Table 4 Measured values of Residual Stresses

Condition	$\sigma_{res,x}$ (MPa)	Mean $\sigma_{res,x}$ (MPa)
(1) 0% σ_y over load (as-welded)	202	209.3 (0.891 σ_y)
	227	
	199	
(2) 50% σ_y over load	190	159.5 (0.679 σ_y)
	129	
(3) 85% σ_y over load	78	107.0 (0.455 σ_y)
	146	
	97	

3.1.4 정적 과하중이 가해진 용접 토우부에서의 용접 잔류응력의 간이 측정법

용접 토우부에 하중이 가해지면 Table 4에 나타난 바와 같이 용접 잔류응력이 해소된다. 이러한 용접잔류응력의 변화는 용접토우부의 응력/변형을 조건을 변화시켜 용접토우부의 피로강도에 매우 큰 영향을 미친다. 그러므로 외부에서 가해지는 정적 하중에 따른 용접잔류응력의 크기변화를 파악하는 것은 용접부의 피로강도 설계에서 매우 중요한 요소이다. 그러나 가해진 하중의 크기에 따른 잔류응력의 해소량의 측정을 위해서는 번거로운 측정방법 (Holl drilling method, Section method, Cutting method etc)을 사용해야만 한다. 용접 토우부의 잔류응력이 피로강도에 미치는 영향의 해석은 평균응력이 피로수명에 미치는 영향과 동일하게 해석할 수 있다. 즉 일정한 잔류응력이 존재하는 상태에서 일정진폭의 반복응력을 가하면 응력진폭은 변하지 않지만 평균응력은 잔류응력의 크기 만큼 변하게 된다. 그러므로 하중의 크기 변화에 따른 용접잔류응력의 절대값 보다는 상대적인 변화의 해석만으로도 그 기여도를 충분히 파악할 수 있다. 이를 토대로 본 연구에서는 이러한 정적 과하중과 피로강도 간의 상관 관계를 간단히 파악할 수 있는 방법을 제시하였다.

용접 토우부에 걸리는 용접잔류응력은 용접재가 용융 상태에서 냉각되면서 수축하여 인장 잔류응력이 생성 되는데 그 크기는 항복응력에 준 한다고 알려져 있다. 이상과 같은 잔류응력 하에서 가해진 하중에 의한 용접 잔류응력의 변화는 용접 토

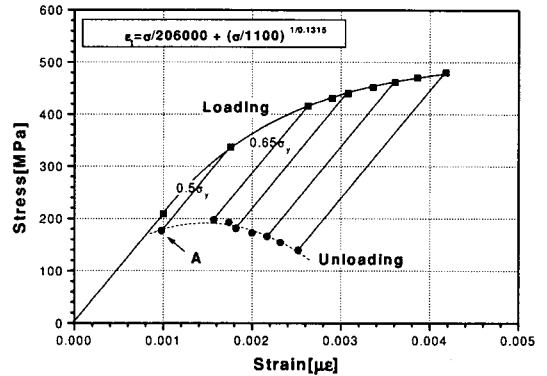


Fig. 4 Change of residual stresses at the weldment toe due to the static overload

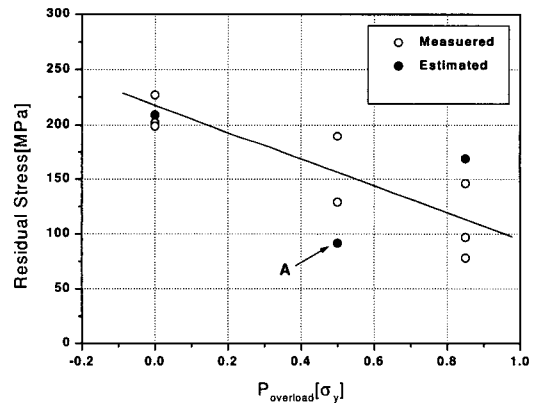


Fig. 5 Comparisons of residual stress measurements between the cutting method and the proposed simplified method

우부가 식(1)과 같이 정의되는 응력-변형을 관계가 성립한다고 볼 수 있다. 이러한 가정 하에서 용접 토우부에 변형을 게이지를 용접 토우부에 부착하여 하중의 크기에 따른 변형률의 변화량을 측정하였다. 이때, 변형률의 크기변화는 용접 토우부에 걸리는 용접 잔류응력의 변화라고 볼 수 있다. 가해진 정적 정적하중과 용접 잔류응력과의 상관 관계를 실험적인 방법에 의하여 구하기 위하여 용접 토우부와 용접 토우부에서 멀리 떨어진 위치에 각각 변형률 게이지를 부착하고 하중을 가하고 제거하는 절차를 반복하면서 가하는 하중의 크기를 점증시켜 간다. 이러한 과정을 반복하면서 가해진 최대 하중

에 따른 용접부 토우와 토우 부근에서의 응력의 상관관계를 Fig. 4와 같이 구하였다. Fig. 5는 측정된 과하중에 의하여 해소된 용접 잔류응력과 본 연구를 통하여 제시된 간이 측정법에 의하여 구해진 용접 잔류응력과의 상관관계를 나타내었다. 그런데 Fig. 4와 5의 A위치에서는 용접잔류응력의 크기가 절단법(Cutting method)에 의하여 측정된 값과 비교할 때 상대적으로 낮은 값을 나타내고 있다. 이것은 시편의 절단 시에 표면의 용융이 발생하고 그 결과 표면의 상태가 모재보다 경화되어 모재의 응력/변형을 관계식에 근거한 응력의 환산 과정에서 나타난 오차로 판단된다. 또한, 용접 직후의 용접 잔류응력의 크기를 모재의 항복응력에 근거하여 환산하였는데 실제로는 용접토우부의 경화로 인하여 항복응력보다 더 큰 초기 용접잔류응력을 가지고 있었기 때문으로 판단된다. 그러나 그 점을 제외하면 측정치의 평균값에 가까운 값을 나타내고 있어 제시한 방법에 의한 잔류응력의 변화량 측정은 타당하다고 사료된다.

3.2 실험결과 및 고찰

3.2.1 용접 잔류응력과 피로한도의 상관관계

용접부의 용접 잔류응력은 용접 토우부에 평균 인장응력의 형태로 피로 강도에 영향을 준다고 볼 수 있다. 본 연구에서는 용접 잔류응력의 크기와 피로 강도의 상관관계를 파악하기 위하여 Fig. 6와 같이 정적 과하중의 크기에 따른 피로시험을 수행하였다. 이때 피로한도의 변화와 용접 잔류응력 간의 상관 관계를 Fig. 7과 같이 나타내었다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 피로한도와 용접 잔류응력 사이에는 일정한 크기 이상(항복 응력의 약 0.5배)의 정적과하중에 대하여 일정한 비례관계가 있음을 알 수 있다. 이상으로부터 정적 과하중에 의한 피로한도의 개선량은 용접 토우부에 존재하는 용접 잔류응력에 의하여 지배된다는 것을 알 수 있다.

3.2.2 용접 토우부 피로에서의 용접 잔류응력과 평균응력과의 관계

용접 구조물의 피로강도는 주변에서 가해지는 외부하중과 이에 따른 토우부근의 응력, 변형을 장의 상태에 의해서 결정된다. 용접 구조물의 피로강도를 결정하는 대표적인 인자는 용접 잔류응력, 토우부에서의 외부하중에 의한 평균응력과 응력진폭의 크기이다. 용접잔류응력은 구조물의 구조, 용접

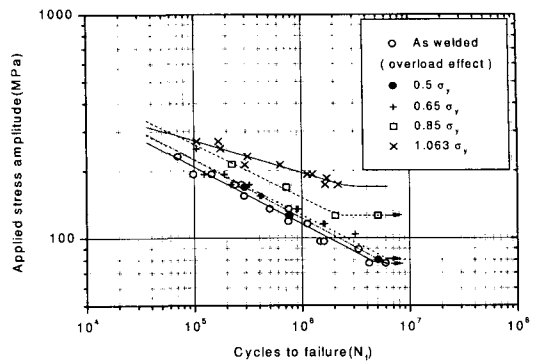


Fig. 6 Overload effects on fatigue lives of fillet weldment

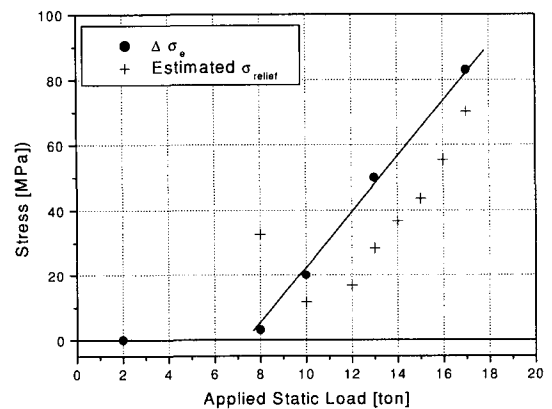


Fig. 7 Static overload effects on the fatigue limits and the residual stress relief at the weldment toe.

의 순서, 용접비이드의 모양, 하중의 형태와 크기에 따라서 변하며 피로수명에 커다란 영향을 미친다. Fig. 8에는 정적 과하중의 효과에 의한 피로한도의 변화량을 본 연구에 의하여 제시된 용접잔류응력과 평균하중에 의해서 존재하는 용접 토우부의 실질적인 평균응력을 계산하고 이에 의거하여 피로수명 데이터를 식(8)을 적용하여 수정하였다. 그 결과 Fig. 8에 나타난 바와 같이 실험 데이터들이 일관성 있게 모여 있는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 용접잔류응력에 의한 용접부 피로에의 영향은 용접 잔류응력을 용접 토우부에 실제로 작용하는 평균응력의 영향과 동일하게 파악될 수 있음을 보여준다. 또한, 본 연구를 통하여 제시된 간이법을 적용할 경우, 용접잔류응력의 크기를 알 수는 없으

나 용접잔류응력의 변화는 알 수 있었으며, 용접부의 피로한도에 대한 영향을 반영할 수 있었다.

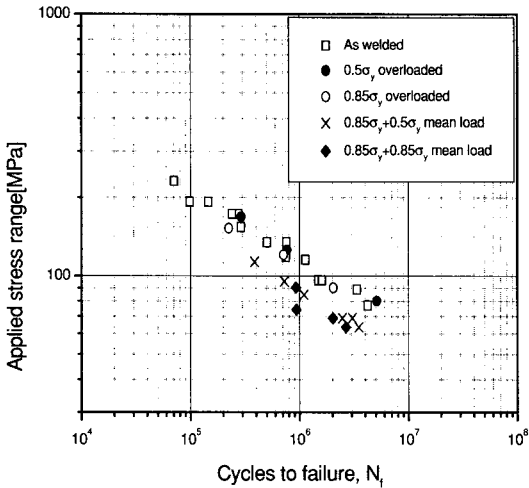


Fig. 8 Fatigue lives corrections which were affected by static-over-load and mean-load by the proposed correction method

4. 결론

비하중 전달방식의 상자형 필렛 용접부의 정적 과하중과 평균하중에 따른 피로 특성 평가를 위하여 실제 구조물에서의 용접조건과 같은 조건으로 용접한 소형 시험편을 제작하여 피로시험을 수행하였다. 본 연구를 통하여 정적 과하중의 크기에 따른 용접 잔류응력의 변화를 간단히 측정할 수 방법을 제안하였으며, 용접 잔류응력의 변화량과 피로한도의 변화량과의 상관관계를 평가하는 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 용접재의 초기 용접잔류응력은 토우부에서 가장 크게 나타났으며 정적 과하중이 가해짐에 따라 인장 잔류응력이 감소하였으며 그 감소폭의 크기는 정적인 과하중이 커짐에 따라 증가하였다. 또한 간이법에 의한 잔류응력의 변화량은 절단법에 의한 측정 결과와 잘 일치하였다.

2) 피로시험의 결과 동일수명에 대하여 정적인 과하중의 크기가 클수록 피로 강도는 증가하였으며, 반대로 평균응력의 크기가 클수록 피로강도는 감소하였다. 또한, 과하중의 크기가 커질수록 재료

의 응력-변형률 관계의 비선형성으로 인하여 피로 강도의 변화가 뚜렷하게 나타났다.

3) 용접부의 피로수명은 용접 토우부의 국부적인 응력/변형률 상태에 의하여 지배되며, 용접 토우부에 걸리는 정적 과하중에 따른 용접잔류응력의 변화와 용접부에 가해지는 외부 평균하중의 함에 의해서 용접토우부에 나타나는 실제 평균응력의 효과를 고려하여 피로 실험 데이터를 보정하였다. 그 결과, 여러가지 하중의 조합 하에서의 피로한도의 변화를 일관성 있게 설명할 수 있었다.

참고문헌

1. Maddox, S. J., "Fatigue Strength of Welded Structures," Abington Publishing, Second Edition, 1991.
2. Gurney, T. R., "Fatigue of Welded Structure," Cambridge University Press, Second Edition, 1979.
3. Lee, Y. B. and 4 men, "The Characteristics of Fatigue Behavior due to Residual Stresses in Mild Steel Weldment," 대한기계학회 추계학술대회는 문집 A, pp. 12-17, 1996.
4. 이용복, 조남일, "피로균열이 진전할 때 용접잔류응력의 재분포와 그 영향," 대한용접학회지 제 13권 4호, 1995년 12월.
5. Otegui, J. L., Mohaupt, U. H., and Burns, D. J., "A Strain Gauge Technique for Monitoring Small Fatigue Cracks in Welds," Engineering Fracture Mechanics Vol. 40 No. 3, pp. 549-569, 1991.
6. 엄동석, 강성원, 김하진, "용접잔류응력장에서의 피로균열전파특성에 대한 연구," 부산대학교 공과대학 연구보고 제33집 별쇄, pp. 63-73, 1987년 6월.
7. 엄동석, 강성원, "십자형용접 이음부에 있어서 부정형이 응력분포에 미치는 영향에 관한 연구," 부산대학교 공과대학 연구보고 제31집 별쇄, pp. 79-84, 1986년 6월.
8. 엄동석, 강성원, 이성구, 김원범, "선체구조의 용접이음부의 피로강도 해석법에 관한 연구," 대한용접학회지 제10권 4호 1992년 12월.
9. Kim, W. S., Tomita, Y., Hashimoto, K., and Osawa, N., "Effects of Static Load on Fatigue Strength of Ship Structure," ISOP, 1997.

10. Shin, J. S., "A study on the characteristics of fatigue failure for load-carrying fillet welded cruciform joint," A paper of master, Pusan National University, 1997.
11. British Standard Institution, "Steel, Concrete and Composite Bridges, Part 10. Code of Practice for Fatigue," BS 5400, Part 10, 1980.
12. Hobbacbor, A., "Fatigue Design Recommendations," International Institute of Welding, X III-1539-94/X V 845-94, September, 1994.
13. Bannantine, J. A., Comer, J. J., and Handrock, J. L., "Fundamentals of Metal Fatigue Analysis," Prentice-Hall, Inc., 1990.