

비드형상 및 복수 표면균열의 확률적 특성을 고려한 필릿 용접부 피로수명 평가

한 승 호* · 한 정 우*

*한국기계연구원 시스템엔지니어링연구본부

Fatigue Life Estimation of Fillet Welded Joints Considering Statistical Characteristics of Weld Toe's Shape and Multiple Collinear Surface Cracks

Seung-Ho Han* and Jeong-Woo Han*

*System Engineering Research Division, Korea Institute of Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

Abstract

The fatigue life of welded joints is associated with crack initiation and propagation life. These cannot be easily separated, since the definition of crack initiation is vague due to the initiation of multiple cracks that are distributed randomly along the weld toes. In this paper a method involving a notch strain and fracture mechanical approach, which considers the characteristics of welded joints, e.g. welding residual stress and statistical characteristics of multiple cracks, is proposed, in an attempt to reasonably estimate these fatigue lives. The fatigue crack initiation life was evaluated statistically, e.g. the probability of failure occurrence in 2.3, 50 and 97.7%, in which the cyclic response of the local stress/strain in the vicinity of the weld toes and notch factors derived by the irregular shape of the weld bead are taken into account. The fatigue crack propagation life was simulated by using Monte-Carlo method in consideration of the Mk -factor and the mechanical behavior of mutual interaction/coalescence between two adjacent cracks. The estimated total fatigue life, $(N_T)_{P50\%}$, as a sum of crack initiation and propagation life under the probability of failure occurrence in 50% showed a good agreement with the experimental results. The developed technique for fatigue life estimation enables to provide a quantitative proportion of crack initiation and propagation life in the total fatigue life due to the nominal stress range, ΔS .

* Corresponding author : seungho@kimm.re.kr

(Received March 22, 2005)

Key Words : Crack initiation life, Fatigue crack propagation life, Multiple surface crack, Probability of occurrence, Monte-Carlo simulation

1. 서 론

피로하중을 받는 용접구조물의 피로수명은 균열발생과 진전수명으로 나누어지고, 서로 다른 기구에 의해 영향을 받으므로 이를 고려한 수명평가법¹⁻⁸⁾이 개발되어 적용되고 있다. 일반적으로, 용접부의 균열발생수명은 노치 선단에 작용하는 노치응력 또는 변형률과 이들의 반복 응답특성을 고려한 노치변형률법¹⁻⁴⁾으로 평가

하며, 균열진전수명은 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열간의 간섭, 합체 및 성장 기구를 고려한 파괴역학적 방법론⁵⁻⁸⁾으로 평가된다.

노치변형률법의 적용을 위해서 용접비드 선단의 기하학적인 불연속부 및 용접잔류응력 효과도 함께 평가해야 한다. 용접비드 선단의 기하학적인 불연속부는 용접 조건과 작업자의 기량에 따라 큰 차이가 나며 그라인딩과 같은 후처리에 의해서도 영향을 받으므로, 노치변형률법의 적용을 위해서 적용 대상 용접부 비드 선단부의

기하학적인 변화를 계측하여, 이를 통해 계산되는 피로 노치계수 K_f 의 확률적인 분포특성을 고려해야 한다.

파괴역학적 방법론의 경우 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가구조 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력확대계수 상승분 Mk -계수^{7,8)}를 고려해야 한다. 또한 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장을 모사해야 한다. 그러나, 용접부에 발생하는 표면균열은 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상을 띠고 있다. 따라서, 실제 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기, 위치 및 형상변화의 확률적 분포특성을 고려한 피로균열진전수명 기법 적용이 요구된다.

본 연구에서는 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부를 선정하여, 비드 선단부의 기하학적인 변화와 복수 표면균열의 개수, 발생위치 및 형상비 변화 등과 같은 확률적 특성을 고려한 용접부 피로수명 평가를 수행하였다.

2. 시험편, 피로시험 및 확률특성

2.1 시험편

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부의 형상이다. 사용강재는 일반 용접구조용 강재인 SM490B이고, K-71T 용접와이어를 이용한 CO₂-가스 반자동 용접으로 시험편을 제작하였다. Table 1은 사용강재의 물성치이다. 용접비드 선단부에 분포하는 용접잔류응력을 홀드릴링 및 단면절단법을 이용하여 계측하였다. Fig. 2는 응력집중이 가장 크게 발생하는 용접비드 선단에서 시험편 길이방향(하중방향과 일치)으로 계측된 용접잔류응력 성분의 평균값과 이를 스퀘어 밴드를 나타낸 결과이다.

2.2 피로시험

용접이음부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of SM490B

Chemical Composition (wt%)							
C	Mn	P	S	Si	Ni	Cr	Mo
0.155	1.304	0.0166	0.0104	0.423	0.032	0.038	0.018
Mechanical Properties							
σ_y (MPa)	UTS (MPa)		El. (%) (G.L. = 130mm)				
352	514		29				

크기, 분포 및 피로수명을 얻기 위하여 피로시험을 실시하였다. MTS사의 100ton 용량 유압가력기를 사용하여 정현파형의 일정진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비 R 및 하중 주파수는 각각 0.1, 10Hz로

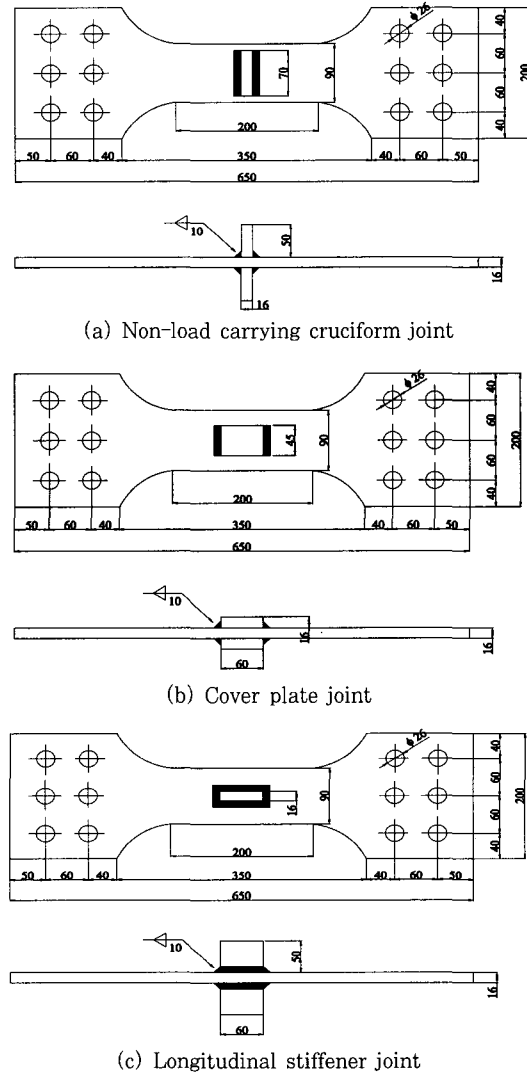


Fig. 1 Configuration of specimens(unit : mm)

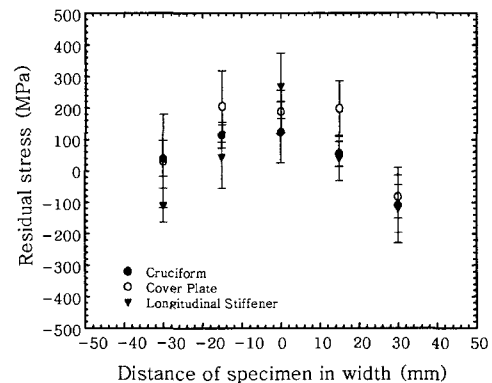


Fig. 2 Mean value of measured welding residual stress with scatter-band

하였다.

2.3 비드형상 및 복수 표면균열의 확률특성

용접비드 선단의 기하학적 형상은 대표적으로 노치반경 ρ 및 플랭크 각 θ 로 표현할 수 있고, 이는 실리콘 플라스틱을 이용하는 비파괴 측정법을 적용하여 측정할 수 있다. 측정결과를 정규확률지에 나타내면 Fig. 3과 같고, 측정된 ρ 와 θ 의 누적확률 $P_{1,2,3\%}$, $P_{50\%}$ 및 $P_{u,2.3\%}$ 를 Table 2에 정리하였다.

비드선단에서 발생하는 복수 표면균열의 개수, 발생 위치 및 형상비 변화 등과 같은 확률적 특성을 평가하기 위하여, 피로시험 중 염료투입시험을 실시하였고, 시험 종료 후 파면분석을 통하여 염료투입 시점에서의 복수 표면균열의 크기와 위치를 측정하였다.

Fig. 4는 세 가지 용접이음부에 대하여 진행된 피로 시험에서 각각 11개의 시험편(총 33개) 파면해석을 통해 염료투입 시점 N_D 에서 측정된 균열깊이 a 의 크기를 전체수명 N_T 의 비율 N_D/N_T 로 정리한 결과이다. N_T 의 40% 정도까지 a 의 평균값은 0.5mm 내외이

고, 이후 증가함을 볼 수 있다. 용접부 피로균열 발생 수명에 대한 a 는 0.5~1.0mm인 것이 일반적⁽⁹⁻¹¹⁾이므로, 본 연구에서 얻어진 $0.4 \cdot N_T$ 미만에서 측정된 균열을 균열발생 단계의 초기균열이라 정의할 수 있다.

균열개수 n 에 대한 확률분포를 정규분포 확률지에 나타내면 Fig. 5(a)와 같다. 그림 중에 50% 확률 $P_{50\%}$ 에 대한 n 을 표기하였다. 균열발생위치 l_0 의 경우 n 과 마찬가지로 분포특성이 정규분포 특성을 잘 추종하였고, 결과는 Fig. 5(b)와 같다. 균열깊이 a 를 n

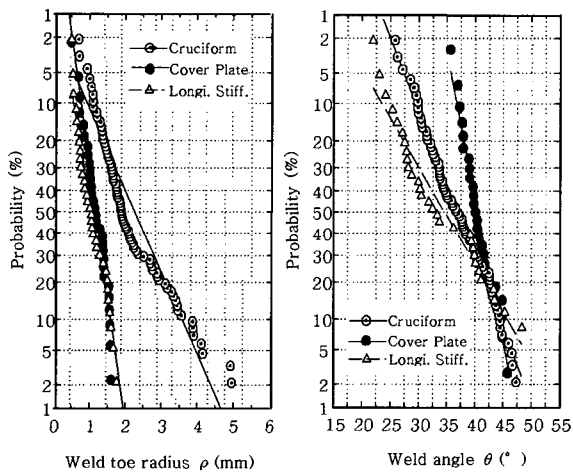


Fig. 3 Probability of ρ and θ

Table 2 Probability of ρ and θ for specimens

		$P_{1,2,3\%}$	$P_{50\%}$	$P_{u,2.3\%}$
Cruciform	ρ (mm)	0.87	2.19	3.54
	θ (°)	29.5	36.9	44.5
Cover Plate	ρ (mm)	0.68	1.11	1.52
	θ (°)	36.8	40.5	44.2
Longitudinal Stiffener	ρ (mm)	0.59	1.10	1.62
	θ (°)	22.5	35.0	47.3

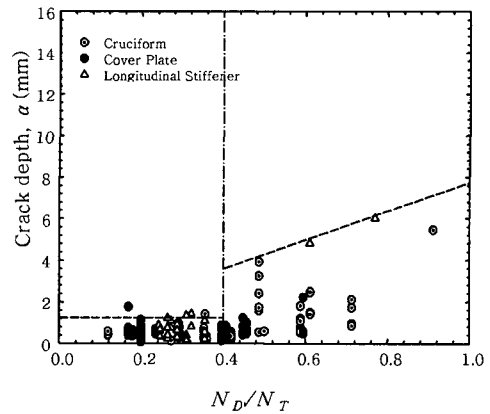
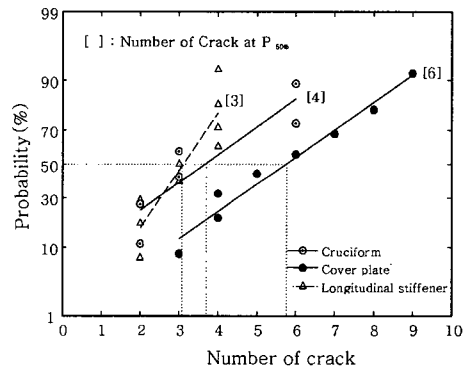
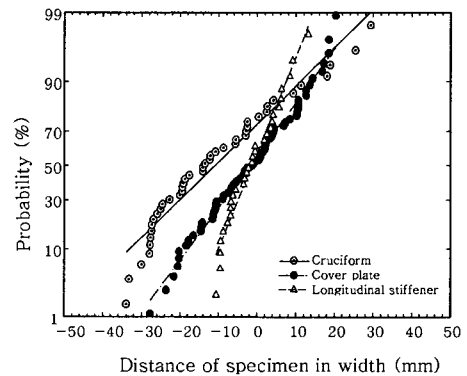


Fig. 4 Relation between a regarding to N_D/N_T



(a) Number of cracks



(b) Crack position

Fig. 5 Probability of number of cracks and crack position

및 확률밀도함수 $f(q)$ 로 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림은 대표적으로 커버 플레이트에 대한 것으로, a 는 n 및 l_o 와는 다르게 와이블 분포특성을 따른다. 이러한 특성은 균열길이 $2c$ 에서도 동일하였다. Table 3은 n , l_o , a 및 $2c$ 의 평균 μ 와 표준편차 σ 를 정리한 결과이다.

3. 피로균열수명 평가법

3.1 피로균열발생수명 평가법

용접구조물의 피로균열발생수명 평가를 위한 대표적인 노치변형률법은 Lawrence¹⁾, Reemsnyder²⁾ 및 Seeger 등³⁾에 의해 제안되었다. 최대 공칭응력 S_{max} 가 작용하는 경우, 노치에 발생하는 최대 노치응력 σ_{max} , 최대 노치변형률 ϵ_{max} 및 잔류응력 σ_r 의 관계를 표현하면 다음과 같다.

$$\sigma_{max} \epsilon_{max} = \frac{(K_f S_{max} + \sigma_r)^2}{E} : \text{Lawrence} \quad (1)$$

$$\sigma_{max} \epsilon_{max} = \frac{1}{E} \left(\frac{K_f S_{max}}{1 - \sigma_r / \sigma_{max}} \right)^2 : \text{Reemsnyder} \quad (2)$$

$$\sigma_{max} \epsilon_{max} = \frac{(K_f S_{max})^2}{E} + \sigma_{max} \frac{\sigma_r}{E} : \text{Seeger} \quad (3)$$

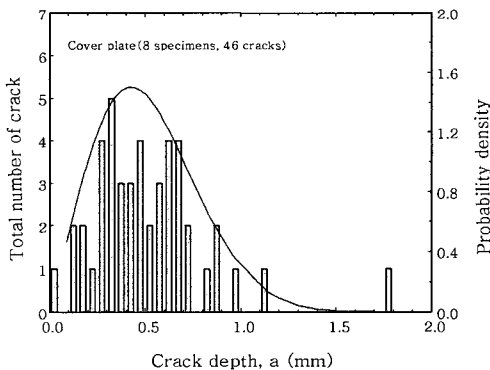


Fig. 6 Statistical characteristics of a

Table 3 μ and σ of n , l_o , a and $2c$

		$n(ea)$	$l_o^*(mm)$	$a(mm)$	$2c(mm)$
Cruciform	μ	4	34.1	0.43	2.51
	σ	2	17.1	0.2	1.37
Cover Plate	μ	6	43.1	0.52	3.84
	σ	3	12.3	0.26	2.51
Longitudinal Stiffener	μ	3	43.8	0.64	5.45
	σ	1	6.9	0.42	3.37

* distance from the edge of specimen in width

여기서, K_f 는 피로노치계수로서 Fig. 3과 같은 용접 비드 선단의 ρ 와 θ 의 분포와 각 용접이음부의 부가구조 형상을 고려한 응력집중계수 K_t 와 Peterson 관계식¹²⁾으로부터 계산된다. K_f 는 용접이음부에 대하여 구해진 경험식 또는 유한요소해석을 통해 얻어진다. Fig. 7은 Table 2에서 각 θ 에 대하여 $P_{1,2.3\%}$, $P_{50\%}$ 및 $P_{u,2.3\%}$ 의 ρ 를 기준으로 K_t 및 K_f 를 누적확률지에 나타낸 결과이다.

사용된 소재의 반복응력 $\Delta\sigma$ 와 반복변형률 $\Delta\epsilon$ 의 관계는 다음 식을 따른다.

$$\Delta\epsilon = \frac{\Delta\sigma}{E} + \left(\frac{\Delta\sigma}{K'} \right)^{1/n'} \quad (4)$$

여기서, K' 와 n' 는 각각 반복강도계수와 반복변형률경화지수이다.

식(1)~(3)과 식(4)를 연립하여 σ_{max} 와 $\Delta\epsilon$ 를 구하고, 중첩되는 σ_r 의 영향을 평균응력의 효과로 고려한 피로균열발생수명 N_f 는 Smith-Watson-Topper¹³⁾가 제안한 방법으로 구할 수 있다.

$$\sigma_{max} \frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{(\sigma_f')^2}{E} (2N_f)^{2b} + \sigma_f' (\sigma_f')^{b+c} \quad (5)$$

여기서, σ_f' 와 ϵ_f' 는 각각 피로강도계수와 피로연성계수이고, b 와 c 는 각각 피로강도지수와 피로연성지수이다. 피로균열의 발생이 용접비드 선단부, 즉 열영향부에서 발생하므로, 이곳의 피로물성 자료가 필요하다. 시험편 채취와 균열발생 위치 조절 등의 문제로 열영향부 피로물성을 직접적으로 계측하는 것은 어려우므로, 이 위치에서 용접작업시 발생하는 열 이력과 동

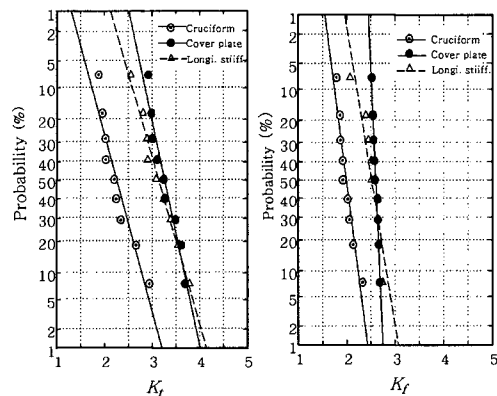


Fig. 7 Probability of calculated K_t and K_f

일하게 열처리된 표준 시험편을 제작하여 물성치를 구하였다⁴⁾. 얻어진 피로물성은 Table 4와 같다.

식(1)~(3)의 잔류응력 σ_r 은 외력에 의해서 이완되며, 식(4)의 $\Delta\sigma$ - $\Delta\varepsilon$ 관계로부터 얻어진다. Fig. 8은 공칭응력범위 ΔS 의 1회 반복 후 십자형 필릿 용접이음부의 σ_r 이완량을 나타낸 결과의 예이다. $\Delta S=100\text{MPa}$ 를 기준으로 이 보다 큰 영역에서는 σ_r 이 대부분 이완되는 특성을 보인다. σ_r 이 피로수명에 미치는 ΔS 는 주로 100MPa 이하에서 두드러지게 나타난다.

3.2 피로균열진전수명 평가법

용접부에 발생하는 표면균열은 2.3절에서 살펴보았듯이 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상을 띠고 있다. 용접이음부의 복수 표면균열진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구는 물론, 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가구조 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력확대계수 상승분 Mk -계수를 고려해야 한다.

3차원 복수 표면균열의 응력확대계수 $(K_I)_{3D}$ 는 최외곽에 위치한 균열끝단의 경우와 인접한 균열간의 간섭을 고려한 경우에 대하여 다음과 같이 구할 수 있다.

Table 4 Fatigue properties of heat-treated specimen

Cyclic strain hardening coefficient, K' (MPa)	1187
Cyclic strain hardening exponent, n'	0.139
Fatigue strength coefficient, σ'_f	878
Fatigue strength exponent, b	-0.083
Fatigue ductility coefficient, ϵ'_f	1.632
Fatigue ductility exponent, c'	-0.772

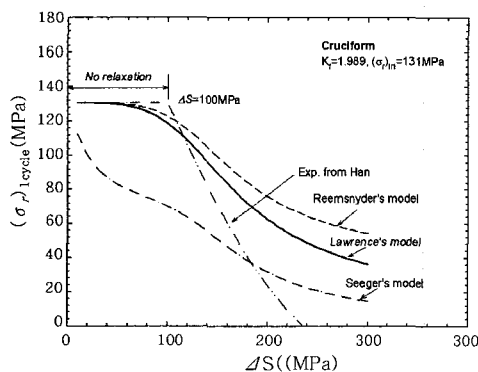


Fig. 8 Remaining residual stresses derived by relaxation model and other equation

$$\text{최외곽 균열} : (K_I)_{3D} = Mk \sigma_i \sqrt{\pi a} F_{Fett} \quad (6)$$

$$\text{인접 균열} : (K_I)_{3D} = Mk \sigma_i \sqrt{\pi a} F_{Yuuki} F_{Fett} \quad (7)$$

복수 표면균열의 합체조건과 균열진전해석을 위해 Paris식이 활용된다. 이상과 같은 평가법은 저자 등⁸⁾의 논문에서 상세히 언급되어 있다.

2.3절에서 실험적으로 얻어진 복수 표면균열의 확률적 특성인 n , l_o , a 및 $2c$ 의 분포와 식(6)과 (7)을 이용한 파괴역학적 파라미터 산정법 및 균열진전수명 계산 프로그램⁽⁸⁾으로 용접이음부의 피로균열진전수명의 확률적 평가를 수행하였다. 이를 위하여, 각 용접이음부에 대한 n 을 고정하고, l_o , a 및 $2c$ 를 확률변수로 놓았다. 피로시험에서 주어진 공칭응력범위 ΔS 를 세 개의 준위로 취하여 각각에 대해 파괴역학적 파라미터 산정법 및 계산 프로그램을 상용소프트웨어인 NESSUS Ver.7.01에 연결하여 피로균열진전수명을 계산하였다. 확률적 평가법은 몬테카를로법을 적용하였다. 충분한 확률변수의 표본집단을 생성하기 위하여 확률변수의 분포특성이 반영된 적절한 난수추출횟수를 2,000개로 하였다.

4. 표면균열의 확률적 특성을 고려한 피로수명 평가

4.1 피로균열발생수명

Fig. 7과 같은 용접비드 형상 ρ 및 θ 에 의한 K_f 의 누적확률 결과와 3.1절의 방법론으로 피로균열발생수명 N_f 의 확률분포를 정량적으로 구할 수 있다. Fig. 9는 K_f 의 누적확률 중 $P_{1,2.3\%}$, $P_{50\%}$ 및 $P_{9,97.7\%}$ 에 해당하는 값과 노치변형률법 중 Reemsnyder의 식(2)를 적용하여 얻어진 결과이다. 여기서, 누적확률

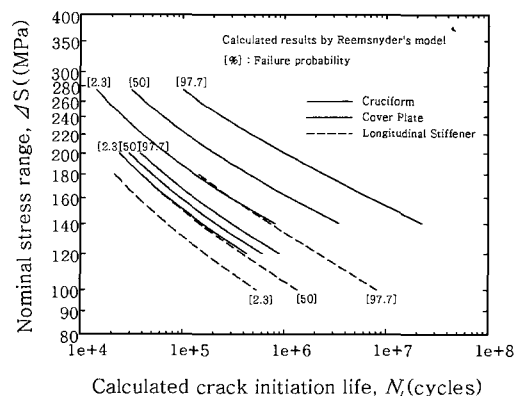


Fig. 9 Probability of fatigue crack initiation life by using Reemsnyder's equation

2.3%는 BS규격¹⁴⁾에서 설계선도로 활용하는 nominal probability factor $d=2$ 를 의미한다. 피로수명 선도는 파손확률 P_f 로 표현되고 상·하한계 선도는 각각 $P_f=2.3\%$ 및 97.7% 에 준한다.

4.2 피로균열진전수명

각 용접이음부에 주어진 세 가지 ΔS 준위를 기준으로 3.2절에서 기술한 파괴역학 기법과 확률적 평가법인 몬테카를로법을 계산된 $P_{50\%}$ 에 준하는 피로균열진전수명 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 을 구할 수 있다. Fig. 10은 대표적으로 커버 플레이트 용접이음부에 대한 결과이다. n 의 최소, 최대값에 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 변화비는 2.2($n=1:11$) 정도로 얻어짐을 알 수 있다.

Fig. 10과 같은 n 에 대한 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 의 확률분포를 토대로 세 가지 용접이음부의 $P_f=2.3\%$ 50% 및 97.7%에 준하는 N_P 를 구하고, 피로균열진전수명 선도로 나타내면 Fig. 11과 같다.

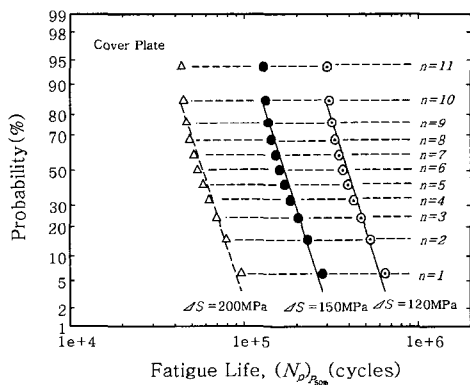


Fig. 10 Calculated $(N_P)_{P_{50\%}}$ regarding to n of cover plate joint

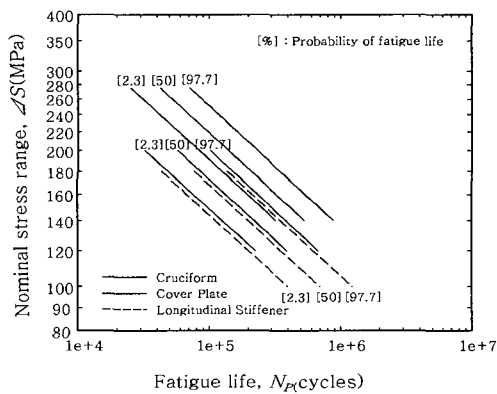
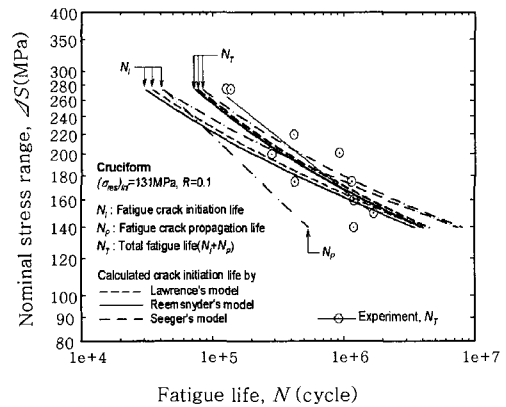


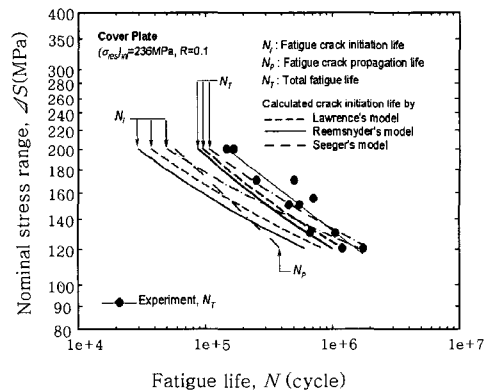
Fig. 11 Probability of fatigue crack propagation life

4.3 고찰

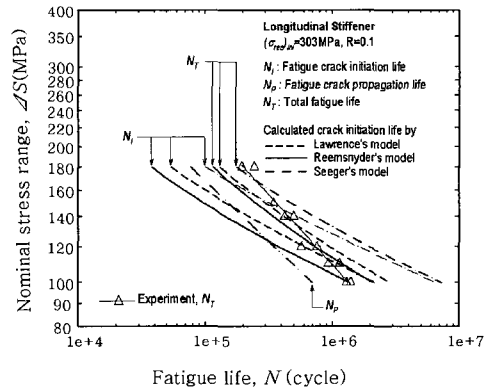
Fig. 9의 균열발생수명 중 $P_{f,50\%}$ 에 대한 $(N_I)_{P_{50\%}}$ 과 Fig. 11에서 계산된 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 를 합하면 전체수명 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 를 구할 수 있다. Fig. 12는 ΔS - $(N_T)_{P_{50\%}}$ 결과로서, 피로시험 자료와 같이 나타내었다. 종방향 거셋 용접이음부의 낮은 ΔS 에서 Lawrence¹⁾와 Seeger³⁾에 의한 $(N_I)_{P_{50\%}}$ 가 실험치를 과대평가하여 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 가 실험치 보다 커지는 경우를 제외하고, $(N_T)_{P_{50\%}}$ 는 적



(a) Non-load carrying cruciform joint



(b) Cover plate joint



(c) Longitudinal stiffener joint

Fig. 12 Comparison of estimated $(N_T)_{P_{50\%}}$ and experimental result

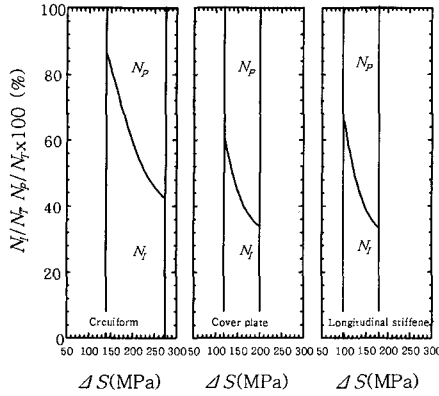


Fig. 13 Ratios of $(N_I)_{P_{50\%}}$ or $(N_P)_{P_{50\%}}$ against $(N_T)_{P_{50\%}}$ for welded joints

용된 용접이음부에 대해 얻어진 실험결과와 잘 일치하였다.

Fig. 13은 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 의 결과로부터 피로균열발생 및 진전수명이 전체수명에서 차지하는 비율을 ΔS 의 크기로 정리한 것이다. 여기서, $(N_I)_{P_{50\%}}$ 는 Reemsnnyder²⁾의 것이다. ΔS 의 증가에 따라 $(N_I)_{P_{50\%}} / (N_T)_{P_{50\%}}$ 가 감소하는 경향을 보인다. 이는 고응력 범위에서 피로균열진전수명이, 그리고 저응력 범위에서 피로균열발생수명이 전체수명에서 많은 부분을 차지하는 일반적인 현상을 잘 설명해 준다.

본 연구에서 제안한 방법으로 용접이음부에 대한 다양한 확률분포에 대응하는 피로수명을 평가할 수 있었다. 균열발생수명 평가에 있어서, 얻어진 결과의 정확도는 용접비드 형상에 의한 노치계수 K_f 의 분포특성과 초기 용접잔류응력 및 이완 평가에 달려있다. 그리고, 균열진전수명평가는 복수 표면균열의 확률적 특성에 대한 실험적 자료가 얼마나 충분히 확보되어 있는가에 따라 해석의 정확도가 결정됨을 알 수 있었다.

5. 결 론

본 연구에서는 세 가지 용접이음부에 대하여 비드 선단부의 기하학적인 형상 변화와 복수 표면균열 개수 n , 발생위치 l_o 과 형상변화 a 및 $2c$ 등과 같은 확률적 분포특성을 고려한 용접부 피로수명 평가를 수행하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

1) 용접비드 선단의 ρ 와 θ 로부터 노치계수 K_f 의 누적확률을 구하였다. 또한, 파면검사를 통해 $0.4 \cdot N_T$ 미만에서의 초기균열 분포특성 n , l_o , a 및 $2c$ 을 실험적으로 구하였다. 이때, n 과 l_o 은 정규분포를 그리

고 a 와 $2c$ 는 와이블분포를 추종하였다.

2) K_f 의 분포특성, 용접잔류응력 이완 및 노치변형률법으로 BS규격 $d=2$ 에 준하는 파손확률 $P_f=2.3\%$ 및 97.7% 상·하한계 피로균열발생수명 선도를 산출하였다.

3) n , l_o , a 및 $2c$ 을 확률변수로 놓고, 복수 표면균열진전기구와 균열진전수명평가 프로그램을 이용한 몬테카를로 모사를 통해 파손확률 P_f 로 표현되는 피로균열진전수명 선도를 산출하였다.

4) 계산된 피로균열발생 및 진전수명 선도를 고려한 전체수명 선도는 피로실험에서 얻어진 결과 잘 모사하였다.

5) 전체수명 선도에서 ΔS 에 따른 균열진전수명이 전체수명에서 차지하는 비율은 ΔS 의 증가에 따라 큰 폭으로 증가하는 경향을 보였다.

후 기

본 연구내용은 과학기술부 및 산업자원부 연구과제의 일부로 연구수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. F. Lawrence, J. Burk and Y. Yung : Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments, ASTM STP 776 (1982), 33-43
2. H. Reemsnnyder : Evaluating the Effect of Residual Stresses on Notched Fatigue Resistance, Materials, Experimentation and Design in Fatigue (1981), 273-295
3. M. Vormwald and T. Seeger : Crack Initiation Life Estimations for Notched Specimens with Residual Stresses Based on Local Strains, Residual Stresses in Science and Technology (1987), 743-750
4. J.W. Han, S.H. Han, B.C. Shin and J.H. Kim : Fatigue Life Estimation of Welding Details by Using a Notch Strain Approach, Transactions of KSME, 28-7 (2004), 977-985 (in Korean)
5. Y.B. Lee, N.I. Cho and K.E. Park : A Study on Surface Fatigue Crack Behaviour of SS400 Weldment, Journal of KWS, 14-2 (1996), 124-129 (in Korean)
6. J.D. Kim, J.W. Lee and C.S. Hong : Fatigue Life Prediction for Multiple Surface Cracks in Finite Plates, Trans. of the Soc. of Naval Architecture of Korea, 33-4 (1996), 75-86 (in Korean)
7. D. Brownson and M. Lee : Prediction of Weld Toe Magnification Factors for Semi-Elliptical Cracks in T-Butt Joints, Int. Journal of Fatigue, 22 (2000), 369-387

8. J.W. Han, S.H. Han, B.C. Shin and J.H. Kim : Fatigue Life Estimation of Welded Joints by using Mk-factor under a Propagation Mechanism of Multiple Collinear Surface Cracks, *Journal of KWS*, **22-4** (2004), 369-377 (in Korean)
9. K. Yamada, T. Makino and Y. Kikuchi : Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Cracks Emanating from Toe of Fillet Weld, *Journal of JSCE*, **292** (1979), 1-12 (in Japanese)
10. K. Yamada, T. Makino, C. Baba and Y. Kikuchi : Fatigue Analysis Based on Crack Growth from Toe of Gusset End Weld, *Journal of JSCE*, **303** (1980), 31-41 (in Japanese)
11. D. Radaj and C. Sonsino : Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Abington Publishing, Cambridge, England (1998)
12. R. Peterson : Notch Sensitivity, *Metal Fatigue*, New York, McGraw Hill (1959), 293-306
13. K. Smith, P. Watson and T. Topper : A Stress-Strain Function for the Fatigue Damage, *J. Mater.*, **5-4** (1970), 767-778
14. BS 5400 : Steel, concrete and composite bridges, Part10. Code of Practice for Fatigue, British Standard Institution (1980)