

< 논문 >

복수 표면균열의 확률적 특성을 고려한 용접부 피로수명 평가

한 정 우* · 한 승 호*

(2005년 3월 29일 접수, 2005년 9월 26일 심사완료)

Fatigue Life Estimation of Welded Joints considering Statistical Characteristics of Multiple Surface Cracks

Jeong Woo Han and Seung Ho Han

Key Words: Multiple Surface Crack(복수 표면균열), Fatigue Crack Propagation Life(균열진전수명), M_k -Fractor(응력강도계수 상승분), Normal Distribution(정규분포), Weibull Distribution(와이블 분포), Monte-Carlo Simulation(모테카를로 모사)

Abstract

Multiple surface crack distributed randomly along a weld toe influences strongly on the fatigue crack propagation life of welded joint. It is investigated by using statistical approaches based on series of systematic experiments. From the statistical results, initial crack numbers and its locations follow the normal distribution, and the probability of initial crack depths and lengths can be described well by the Weibull distribution. These characteristics are used to calculate the fatigue crack propagation life, in which the mechanisms of mutual interaction and coalescence of the multiple cracks are considered as well as the M_k -factors obtained from a parametric study on the crack depths and lengths. The automatic calculation is achieved by the NESUSS, where the parameters such as the number, location and size of the cracks are all treated as random variables. The random variables are dealt through the Monte-Carlo simulation with sampling random numbers of 2,000. The simulation results show that the multiple cracks lead to much shorter crack propagation life compared with those in single crack situation. The sum of the simulation and the fatigue crack initiation life derived by the notch strain approach agrees well with the experiments.

1. 서 론

용접이음부에서 발생하는 피로파손은 용접부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열에 기인하고, 이는 서로간의 간섭, 합체 및 성장⁽¹⁻⁴⁾하게 된다. 이러한 균열은 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 또한 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상⁽⁵⁻⁷⁾을 띠고 있다. 표면균열 깊이 0.3~0.4mm를 기준으로 부재를 관통 할 때까지의

수명은 전체 피로수명의 60~70% 이상^(8,9)을 차지하고, 발생한 균열의 개수, 형상 및 발생위치에 따른 피로수명은 큰 폭으로 변화된다.

저자 등^(3,4)은 용접구조물의 복수 표면균열 진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구를 고려하는 것은 물론, 부가구조 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력강도계수 상승분 M_k -factor^(10,11)를 고려한 파괴역학 파라메터 산정법을 개발하였다. 이를 통해 실제 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 위치분포를 고려한 피로균열진전수명을 평가하였다. 그러나, 피로균열진전수명은 복수 표면균열의 개수, 형상비 변화 및 발생위치에 따라 크게 변하는 특성이 나타나므로 이에 대한 정량적인 평가가 요구된다. 이 분야의 연구는 국내외

* 책임저자, 회원, 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터

E-mail : jwhan@kimm.re.kr

TEL : (042)868-7432 FAX : (042)868-7418

* 회원, 한국기계연구원 기계시스템신뢰성연구센터

경우 방홍인 등⁽⁵⁾에 의해 주로 이루어지고 있으며, 외국의 경우 원자력 분야 일부^(6,7)에서 진행되고 있다. 이들 연구에서는 용접부에서 발생하는 복수 표면균열의 확률적 특성을 대부분 경험적인 통계적 특성을 추정하여 확률분포로 가정하였고, 표면균열을 2차원으로 해석하였으며, 또한 용접비드 선단의 국부적인 응력강도계수 *Mk*-factor를 고려하지 못하고 있어, 실제 용접구조물의 피로수명 평가의 정도가 낮아지는 문제를 앓고 있다.

본 연구에서는 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부에 대하여, 복수 표면균열의 개수, 발생위치 및 형상비 변화 분포 특성을 실험적으로 구하고, 이의 확률적 특성이 피로균열진전수명에 미치는 영향을 저자 등이 개발한 파괴역학 파라미터 산정법을 적용하여 평가하였다.

2. 용접부 복수 표면균열의 파괴역학적 파라미터 산정법

2.1 간섭을 고려한 복수 표면균열의 응력강도계수
 평가에서 복수 표면균열 선단(균열깊이 = *a*, 균열깊이의 1/2 = *c*)에 작용하는 응력확대계수 $(K_I)_{3D}$ 는 간섭계수 *r_m*과 2차원 복수 관통균열에 대한 간섭계수인 *F_{2D}*를 고려하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 사용된 각종 변수들에 대한 상세 정보는 저자 등의 논문⁽³⁾에 언급되어 있으므로 이를 참조하기 바란다.

$$(K_I)_{3D} = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \{1 + r_m (F_{2D} - 1)\} F_{Fett} \quad (1)$$

복수 표면균열의 합체는 균열선단 표면점 간 연결조건, 즉 표면점간 거리 $\delta_0 = 0$ 을 만족하였을 때 합체된다는 조건을 적용하였고, 합체 이후의 균열을 제정의 하였다.

2.2 *Mk*-factor 도입을 통한 응력강도계수 산정

용접구조물은 부가구조 및 용접비드에 의한 응력집중이 비드 선단에 발생한 균열에도 영향을 주어 국부적으로 응력강도계수를 변화시킨다. 이를 고려하기 위하여 *Mk*-factor^(10,11)를 도입하였다. 따라서, 용접구조물 비드 선단에 발생한 복수 표

면균열의 인접한 균열에 대한 응력강도계수는 평활재에서 얻어진 식 (1)의 수정을 통해 아래 식⁽³⁾을 이용하여 구할 수 있다.

$$(K_I)_{3D} = Mk \cdot \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \{1 + r_m (F_{2D} - 1)\} F_{Fett} \quad (2)$$

Mk-factor는 부가구조, 용접비드 및 표면균열의 형상에 의존하므로 유한요소해석에 의한 파라미터 연구를 통하여 계산식을 도출할 수 있다. 균열 형상비 *a/c*와 두께에 대한 균열깊이 비 *a/t*로 표현되는 *Mk*-factor 계산식은 식 (3)과 같은 함수식으로 나타낼 수 있다.

$$Mk = \{A + B \cdot e^{-C \cdot (a/c)}\} \cdot \left\{ \frac{D + E \cdot (a/t)}{1 + F \cdot (a/t) + G \cdot (a/t)^2} \right\} \quad (3)$$

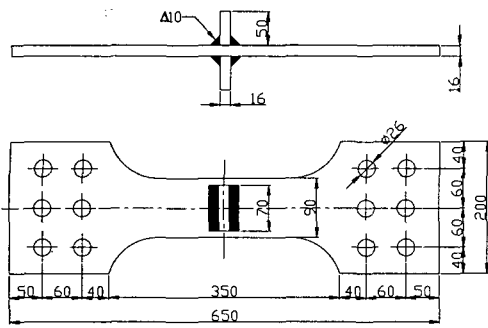
각 용접이음부에 대하여 피팅계수 *A*~*G*를 구하는 방법과 얻어진 결과는 저자 등의 논문⁽⁴⁾에 상세히 기술되어 있다.

3. 복수 표면균열의 확률적 특성

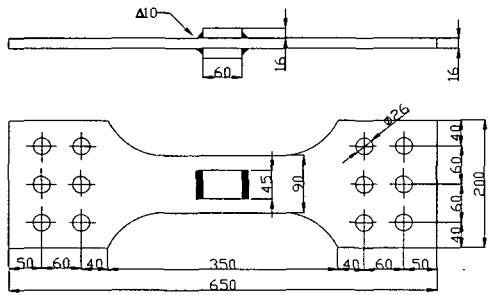
3.1 용접이음부의 종류 및 피로실험

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 용접이음부인 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부의 형상이다. 사용강재는 일반 용접구조용 강재인 SM490B이고, K-71T 용접와이어를 이용한 CO₂-가스 반자동 용접으로 시험편을 제작하였다. 사용강재의 물성치와 용접작업 공정은 저자 등의 논문⁽¹²⁾에 상세히 언급되어 있으므로 이를 참조하기 바란다.

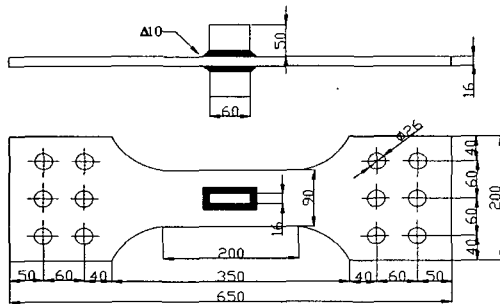
용접이음부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 분포를 얻기 위하여 피로시험을 실시하였다. MTS사의 100ton 용량 유압가압기를 사용하여 정현파형의 일진진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비 *R* 및 하중 주파수는 각각 0.1, 10Hz로 하였다. 피로시험 중 염료투입시험을 실시하였고, 실험 종료 후 파면분석을 통하여 염료투입 시점에서의 복수 표면균열의 크기와 위치를 계측하였다.



(a) Non-load carrying cruciform joint



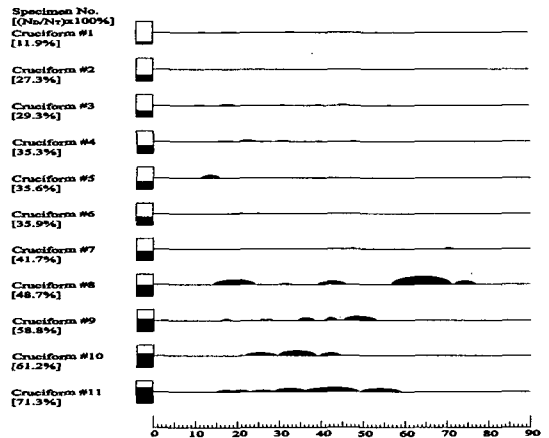
(b) Cover plate joint



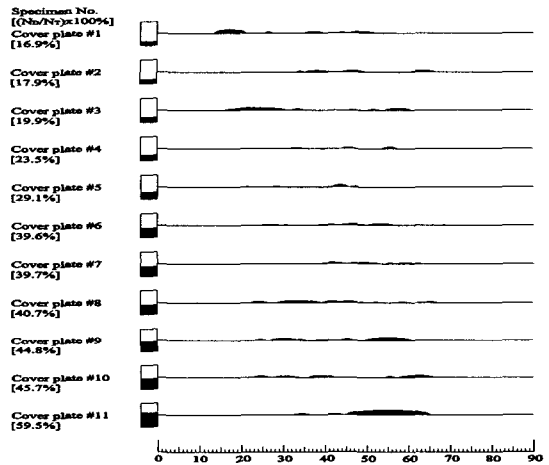
(c) Longitudinal stiffener joint

Fig. 1 Configuration of specimens

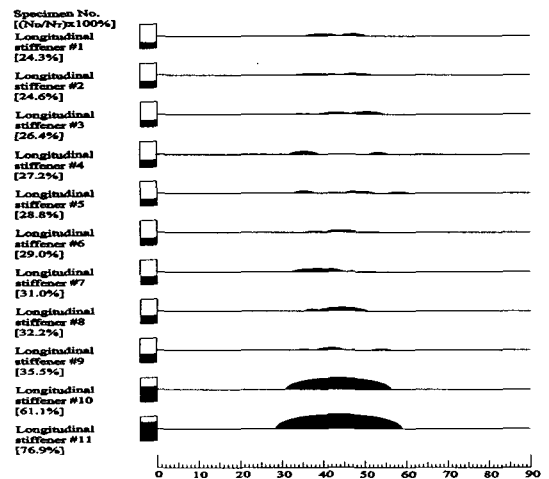
3.2 염료투입시험에 의한 표면균열의 계측
 Fig. 2는 세 가지 용접이음부에 대하여 각각 11개의 시험편(총 33개)에서 진행된 피로시험으로 얻어진 전체수명 N_T 와 서로 다른 염료투입 시점 N_D 의 비 $(N_D/N_T) \cdot 100\%$ 에 따른 균열의 형상이다. $(N_D/N_T) \cdot 100\%$ 가 30~40% 정도일 때, 표면균열은 비드 선단에서 다수 발생된다. $(N_D/N_T) \cdot 100\%$ 가 이보다 커지면 독립적으로 성장하던 복수 표면균열은 인접균열간의 간섭과 합체과정을 통하여 하나의 주균열로 성장한다.



(a) Non-load carrying cruciform joint



(b) Cover plate joint



(c) Longitudinal stiffener joint

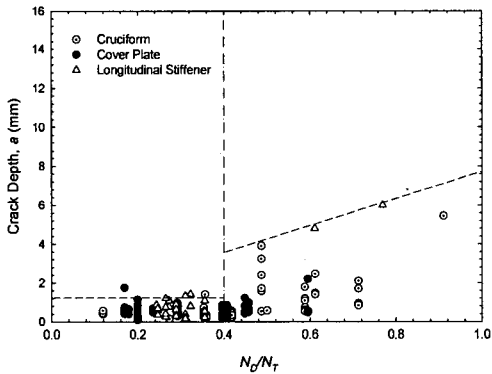
Fig. 2 Feature of cracks appeared on fracture surfaces of welded joints by ink stain test

계측된 a 및 c 의 크기를 반타원형으로 이상화 시켜서 N_D/N_T 에 대해 정리하면 Fig. 3과 같다. N_T 의 40% 정도까지 a 및 c 의 크기의 평균값은 각각 0.5 및 2.5mm 내외이고, 이후 균열의 합체로 인하여 급격히 증가함을 볼 수 있다. 용접부 피로균열 발생수명에 대한 균열깊이 a 를 0.5~1.0mm 정도⁽⁸⁻¹⁰⁾라고 하는 것이 일반적이므로, 본 연구에서 얻어진 $0.4N_T$ 미만에서 계측된 균열을 균열발생 단계의 초기균열이라 정의할 수 있다.

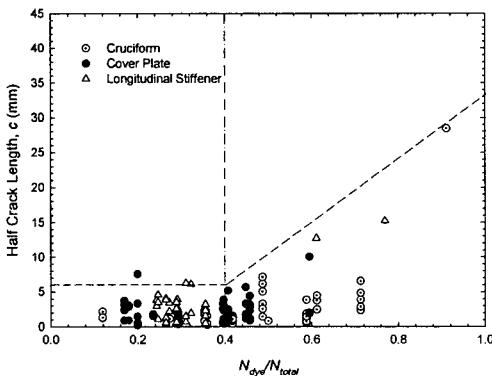
3.3 복수 표면균열 개수 및 발생위치

$0.4 \cdot N_T$ 미만에서 계측된 균열개수 n 에 대한 확률분포를 정규분포 확률지에 나타내면 Fig. 4(a)와 같다. 그림 중에 50% 확률 $P_{50\%}$ 에 대한 n 을 표기하였는데, 이때 n 은 커버 플레이트의 경우 6개, 십자형 필릿 용접이음부의 경우 4개 그리고 중방향 거셋 용접이음부 경우 3개이다. 균열

발생위치 l_o 는 피로균열발생 시점과 상관없이 관찰되어진 모든 균열위치가 균열발생의 시작점으로 간주하여 모든 자료를 대상으로 확률분포를 평가하였다. 이로부터 평가된 l_o 는 n 과 마찬가지로 정규분포 특성을 잘 추종하며, 이를 정규확률지에 나타내면 Fig. 4(b)와 같다. n 과 l_o 에 대한 분포로부터 평균 μ 와 표준편차 σ 의 계산 결과를 Table 1에 정리하였다.

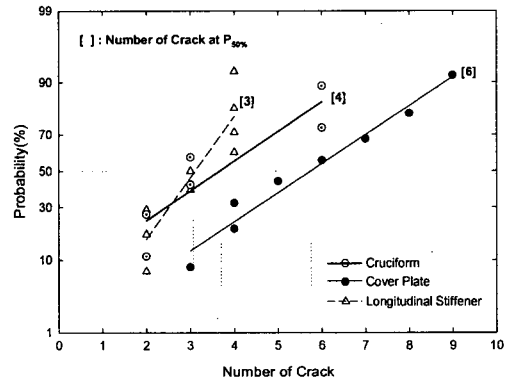


(a) Crack depth a

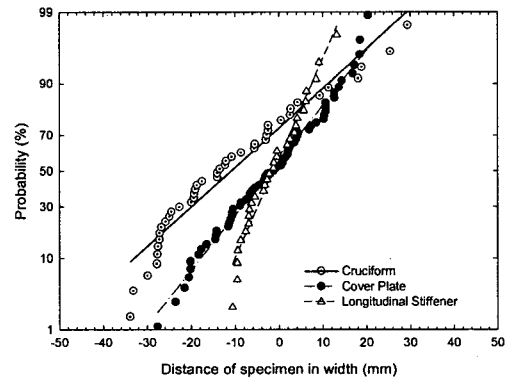


(b) Half crack length c

Fig. 3 Relation between a and c regarding to N_D/N_T



(a) Number of cracks n



(b) Crack position l_o

Fig. 4 Probability of number of cracks and crack position

Table 1 μ and σ of n and l_o for welded joints based on normal distribution

Variables	Welded joints	μ	σ
$n(ea)$	Cruciform	4	2
	Cover plate	6	3
	Longitudinal stiffener	3	1
$*l_o(mm)$	Cruciform	34.1	17.1
	Cover plate	43.1	12.3
	Longitudinal stiffener	43.8	6.9

* distance from the edge of specimen in width

3.4 복수 표면균열의 크기 분포

균열길이 a 와 균열길이 $2c$ 를 발생빈도수 및 확률밀도함수 $f(q)$ 로 나타내면 Fig. 5와 같다. 그림은 대표적으로 커버 플레이트에 대한 것으로, 균열크기는 균열개수 및 발생위치와는 다르게 와이블 분포특성을 따른다. 이러한 특성을 기초로 각 용접이음부에 대한 a 와 $2c$ 의 μ 와 σ 를 구하면 Table 2와 같다.

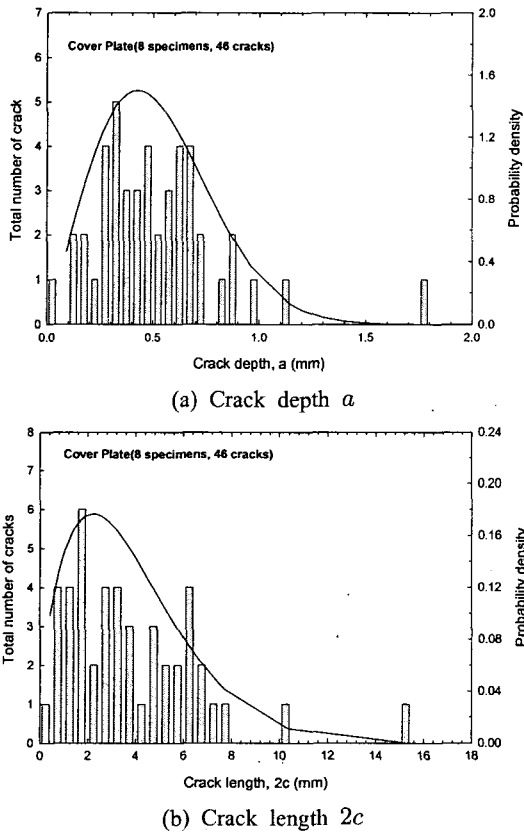


Fig. 5 Statistical characteristics of a and $2c$

Table 2 μ and σ of a and $2c$ for welded joints based on Weibull distribution

Variables	Welded joints	μ	σ
a (mm)	Cruciform	0.43	0.20
	Cover plate	0.52	0.26
	Longitudinal stiffener	0.64	0.42
$2c$ (mm)	Cruciform	2.51	1.37
	Cover plate	3.84	2.51
	Longitudinal stiffener	5.45	3.37

4. 용접이음부의 확률적 피로수명 평가

4.1 평가방법

3절에서 실험적으로 얻어진 복수 표면균열의 개수 n , 발생위치 l_0 및 크기 a 와 $2c$ 의 확률분포와 2절의 파괴역학적 파라미터 산정법 및 피로균열진전수명 계산 프로그램⁽⁴⁾을 이용하여 용접이음부의 피로균열진전수명의 확률적 평가를 수행하였다. 이 때, n 은 통계적 변동을 고려할 때 확률변수로 취급하여 해석할 필요가 있으나, 복수 표면균열의 성장 및 합체를 고려한 균열진전모사에서 n 은 초기 해석조건으로 결정되어져야 하기 때문에 이를 확률변수로 두어 평가하는 것은 곤란하다. 따라서, 본 논문에서는 용접이음부에 대한 n 을 일정하게 하고, l_0 , a 및 $2c$ 를 확률변수로 취급하였다. 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 형성하기 위해서는 확률변수의 분포특성이 반영된 적절한 난수추출횟수를 결정해야 한다. 이를 위하여 $n=9$ 인 커버 플레이트에 대하여 추출횟수에 따른 $P_{50\%}$ 의 피로균열진전수명 $(N_F)_{P_{50\%}}$ 를 비교하였다. Fig. 6에서 보는 바와 같이 추출횟수가 2,000개 미만에서 피로수명은 불안정한 계산결과를 나타내는 반면, 그 이상의 구간에서는 일정한 결과를 보였다. 이와 같은 결과로부터 몬테카를로법의 추출횟수를 2,000개로 사용하였다.

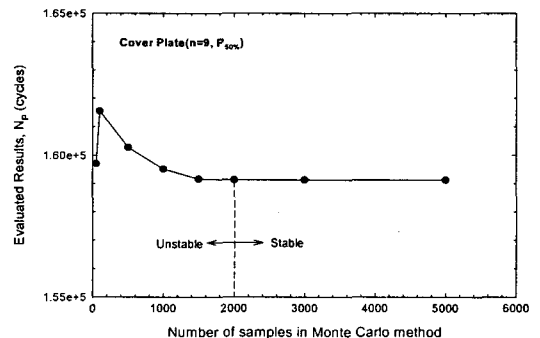


Fig. 6 Effect of sample number on the fatigue life in Monte Carlo method

4.2 피로균열진전수명 평가

각 용접이음부에 주어진 세 가지 ΔS 준위를 기준으로 몬테카를로법으로 계산된 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 를 n 에 대해 확률지에 정리하면 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 단일균열($n=1$)에 대한 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 는 용접부별로 차이가 있지만, 균열수에 비례하여

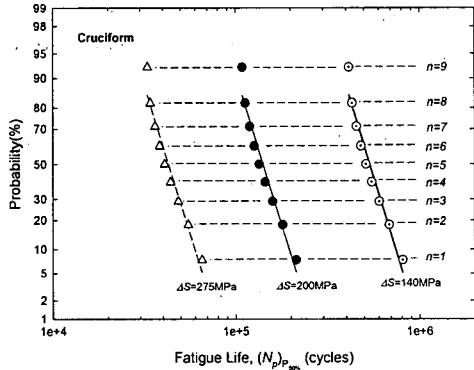
점점 감소함을 보인다. 여기서, 단일균열과 최대 n 값에 대한 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 변화비를 정량적으로 살펴 보면, 십자형 필릿 용접이음부의 경우 2.0($n=1:9$), 커버 플레이트는 2.2($n=1:11$) 그리고 종방향 거셋 용접이음부에서는 1.9($n=1:6$)로 얻어졌다. 현재보다 더 많은 수의 n 을 고려한다면 단일균열과 복수균열에 의한 결과는 이보다 큰 차이를 보일 것이다. 따라서, 피로균열진전수명의 정도를 높이기 위해서는 보다 많은 시험을 통하여 용접이음부에서 발생하는 균열분포를 정량적으로 평가할 수 있는 방법이 연구되어야 한다.

4.3 전체 피로수명의 평가

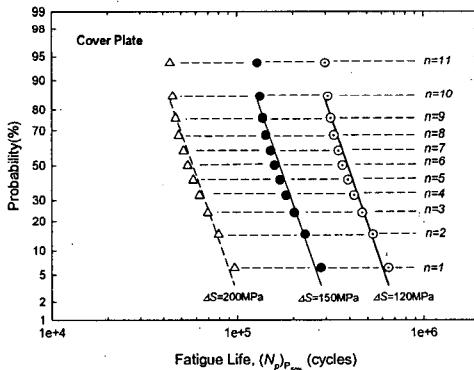
전체 피로수명은 균열발생과 진전의 두 기구로 나누어 평가하였다. 피로균열발생수명은 저자 등⁽¹²⁾의 논문에서 제안한 방법을 적용하여 $P_{50\%}$ 에 대한 $(N_I)_{P_{50\%}}$ 를 구하고, Fig. 7에서 계산된 $(N_P)_{P_{50\%}}$ 를 합하면 전체수명 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 를 구할 수 있다. 참고로, $(N_I)_{P_{50\%}}$ 계산에서는 잔류응력의 영향을 고려하기 위하여 Lawrence, Reemsnyder 및 Seeger 모델의 노치변형률법을 적용하고, 용접비드 형상에 의한 피로노치계수 K_f 분포특성을 고려하였다.

Fig. 8은 $\Delta S-(N_T)_{P_{50\%}}$ 결과로서, 피로시험 자료와 같이 나타내었다. 종방향 거셋 용접이음부의 낮은 ΔS 에서 Lawrence와 Seeger 모델에 의한 $(N_I)_{P_{50\%}}$ 가 실험치를 과대평가하여 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 가 실험치 보다 커지는 경우를 제외하고, $(N_T)_{P_{50\%}}$ 는 적용된 용접이음부에 대해 얻어진 실험결과를 잘 모사하고 있어 4.2절에서 기술한 피로균열진전수명법의 신뢰성을 확인할 수 있다.

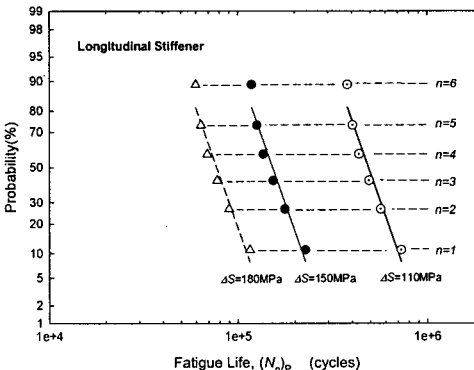
Fig. 9는 $(N_T)_{P_{50\%}}$ 의 결과로부터 피로균열발생 및 진전수명이 전체수명에서 차지하는 비율을 ΔS 의 크기로 정리한 것이다. 여기서, $(N_I)_{P_{50\%}}$ 는 모든 용접이음부에 대하여 비교적 정확한 결과를 산출한 Reemsnyder 모델에 의해 계산된 것이다. ΔS 의 증가에 따라 $(N_I)_{P_{50\%}}/(N_T)_{P_{50\%}}$ 가 감소하는 경향을 보인다. 이는 고응력 범위에서 피로균열진전수명이, 그리고 저응력 범위에서 피로균열발생수명이 전체수명에서 많은 부분을 차지하는 현상으로 설명된다.



(a) Non-load carrying cruciform joint

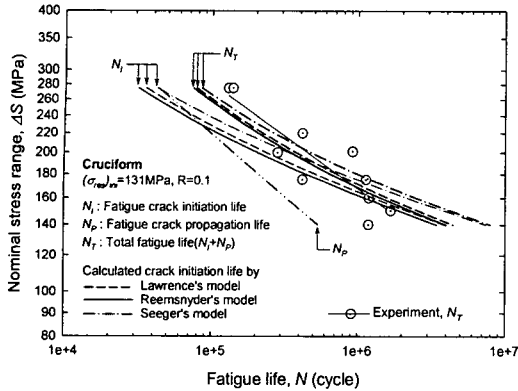


(b) Cover plate joint

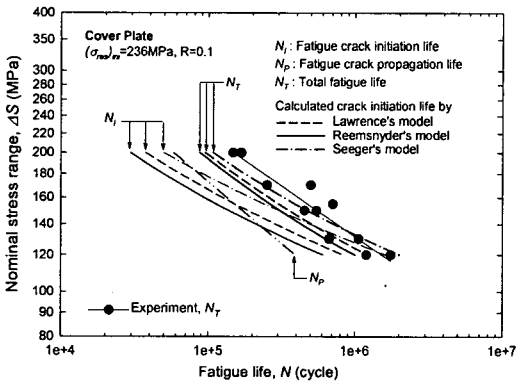


(c) Longitudinal stiffener joint

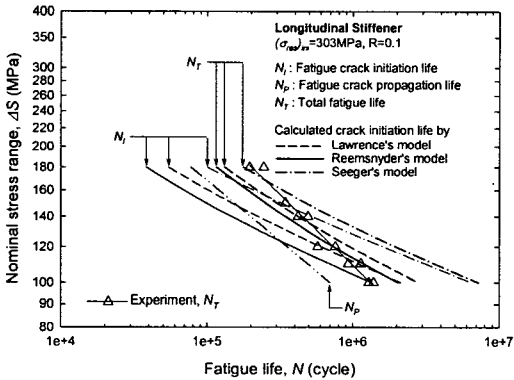
Fig. 7 Calculated $(N_P)_{P_{50\%}}$ regarding to n



(a) Non-load carrying cruciform joint



(b) Cover plate joint



(c) Longitudinal stiffener joint

Fig. 8 Comparison of estimated $(N_T)_{P_{50\%}}$ and experimental results

본 연구에서 제안한 방법으로 용접이음부에 대한 다양한 확률분포에 대응하는 피로수명을 평가하려면, 용접비드 형상을 고려한 피로균열발생수명의 확률분포와 Fig. 7의 결과에서 얻어진 임의의 확률 P 에 준하는 피로균열진전수명을 고려하면 된다.

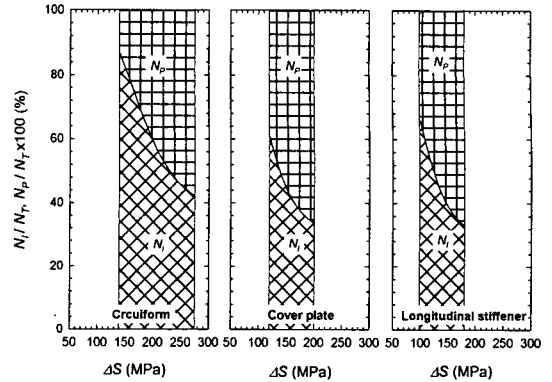


Fig. 9 Ratios of $(N_I)_{P_{50\%}}$ or $(N_P)_{P_{50\%}}$ against $(N_T)_{P_{50\%}}$ for welded joints

4. 결론

십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부에 대하여, 복수 표면균열의 개수, 발생위치 및 형상비 변화 분포 특성을 실험적으로 구하고, 이의 확률적 특성이 피로균열진전수명에 미치는 영향을 평가하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 염료투입법에 의해 계측된 균열깊이는 전체 수명의 40%에서 약 0.5mm 정도이며, 그 이후에는 균열의 합체로 인하여 균열의 크기가 급격히 증가한다.

(2) 파면검사를 통해 $0.4 \cdot N_T$ 미만에서의 초기 균열 분포특성 n , l_0 , a 및 $2c$ 을 실험적으로 구하였다. 이때, n 과 l_0 은 정규분포를 그리고 a 와 $2c$ 는 와이불분포를 추종하였다.

(3) n , l_0 , a 및 $2c$ 의 확률변수로부터 NESSUS와 피로균열진전프로그램에 연결하여 피로균열진전수명을 몬테카를로법으로 평가하였으며, 이 때 추출횟수 2,000개에서 적절한 결과가 얻어졌다.

(4) 노치변형률법과 비드형상의 확률특성을 고려한 피로균열발생수명과 본 연구에서 제시한 피로균열진전수명 평가법으로 계산된 전체 피로수명결과는 실험결과를 잘 모사하였고, 복수표면균열의 확률적 특성에 의한 영향의 정량적 평가가 가능하였다.

후 기

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

참고문헌

- (1) Suh, C., Hwang, N. and Park, M., 1994, "Fatigue Crack Growth, Coalescence Behavior and Its Simulation on Multi-surface Cracks," *Transactions of KSME, Vol. 18, No. 3*, pp. 716~728.
- (2) Kim, J., Lee, J. and Hong, C., 1996, "Fatigue Life Prediction for Multiple Surface Cracks in Finite Plates," *Transactions of the Society of Naval Architecture of Korea, Vol. 33, No. 4*, pp. 75~86.
- (3) Han, J., Han, S., Shin, B. and Kim, J., 2004, "Fatigue Life Estimation of Welded Joints by using Mk -factor under a Propagation Mechanism of Multiple Collinear Surface Cracks," *Journal of KWS, Vol. 22, No. 4*, pp. 369~377.
- (4) Han, J., Han, S., Shin, B. and Kim, J., 2004, "Fatigue Life Estimation of Cruciform Welded Joint considering Multiple Collinear Surface Cracks," *Transactions of KSME (A), Vol. 28, No. 10*, pp. 1549~1557.
- (5) Bang, H. and Yoon, H., 2000, "The Probability Distribution of Fatigue Crack Propagation Life considering Effect of Crack Coalescence," *Transactions of KSME (A), Vol. 24, No. 5*, pp. 1281~1287.
- (6) Nilsson, F., Brickstad, B. and Skanberg, L., 1990, "Failure Probability of Nuclear Piping due to IGSCC," *Int. J. Pres. Ves. & Piping, Vol. 43*, pp. 205~217.
- (7) Xie, L., 1999, "Multi-crack Growth/Coalescence Simulation and its Role in Passive Component Leak-before-break Concept," *Nuclear Engineering and Design Vol. 194*, pp. 113~122.
- (8) Yamada, K., Makino, T., Baba, C. and Kikuchi Y., 1980, "Fatigue Analysis Based on Crack Growth from Toe of Gusset End Weld," *Journal of JSCE, Vol. 303*, pp. 31~41.
- (9) Yamada, K., Makino, T. and Kikuchi Y., 1979, "Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Cracks Emanating from Toe of Fillet Weld," *Journal of JSCE, Vol. 292*, pp. 1~12.
- (10) Madox, S., 1975, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints," *International Journal of Fracture, Vol. 11, No. 2* pp. 221~243.
- (11) Bowness, D and Lee, M., 2000, "Prediction of Weld Toe Magnification Factors for Semi-elliptical Cracks in T-butt joints," *International Journal of Fatigue, Vol. 22*, pp. 369~387.
- (12) Han, J., Han, S., Shin, B. and Kim, J., 2004, "Fatigue Life Estimation of Welding Details by Using a Notch Strain Approach," *Transactions of KSME (A), Vol. 28, No. 7*, pp. 977~985.