

Mk-계수를 고려한 용접부 복수 표면균열 진전수명 평가

한승호* · 한정우* · 신병천* · 김재훈**

*한국기계연구원 구조연구부

**충남대학교 기계설계공학과

Fatigue Life Estimation of Welded Joints by using *Mk*-factor under a Propagation Mechanism of Multiple Collinear Surface Cracks

Seung-Ho Han*, Jeong-Woo Han*, Byung-Chun Shin* and Jae-Hoon Kim**

*Dept. of Structural Engineering, Korea Institute for Machinery and Materials, Daejeon 305-343, Korea

**Dept. of Mechanical Design Engineering, Chung Nam National University, Daejeon 305-764, Korea

Abstract

Failure mechanisms of welded joints under fatigue loads are interpreted that multiple collinear surface cracks initiating randomly along the weld toes propagate under the mutual interaction and coalescence of adjacent two cracks. To estimate fatigue crack propagation life for three types of the representative welded joints, i.e. non-load carrying cruciform, cover plate and longitudinal stiffener joint, the stress intensity factors at the front of the surface cracks have to be calculated, which are influenced strongly by the geometry of attachments, weld toes and the crack shapes. For the effective calculation of the stress intensity factors the *Mk*-factor was introduced which can be derived by a parametric study performed by FEM considering influence of the geometrical effects. The fatigue life of the cruciform joint was estimated by using the *Mk*-factors and the method considering the propagation mechanisms of the multiple surface cracks. Analysis results for the fatigue life had a good agreement with that of experiment.

* Corresponding author ; seungho@kimme.re.kr

(Received May 24, 2004)

Key Words : Fatigue load, Multiple surface crack, Mutual interaction, Coalescence, Fatigue crack propagation life

1. 서 론

피로하중을 받는 용접구조물의 파손은 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열에 의하여 시작되며, 균열 간의 간섭, 합체 및 성장 기구¹⁻⁴⁾를 통해 구조성능이 급격히 저하된다. 복수 표면균열은 용접비드 선단의 기하학적인 불연속부에서 발생하며, 그 크기는 공학적으로 측정이 용이한 균열깊이 0.5mm^{1,5)} 내외로 보고 있다. 이 균열을 기준으로 부재를 관통할 때까지의 피로수명은 외부하중 조건에 따라 차이는 있지만, 전체 피로수명의 "60~70%" 이상을 차지한다¹⁾. 따라서, 용접구조물의 피로수명 평가를 위하여 복수 표면균열 진전수명 평가에 대한 연구가 요구되고 있다.

용접부에 발생하는 표면균열은 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상을 띠고 있다. 지금까지 복수 표면균열의 연구는 주로 단면형상이 일정한 평활재에 대한 것^{2,3,6)}으로 국한되어 있어 실제 용접구조와 같이 복잡한 형상을 갖는 경우, 이의 실용적인 적용에 어려움이 따랐다. 따라서, 용접구조물의 복수 표면균열 진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구는 물론, 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가구조 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력확대계수 상승분 *Mk*-계수⁷⁻⁹⁾를 고려해야 한다.

본 연구에서는 용접 구조상세 중 가장 널리 사용되고 있는 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접 이음부를 선정하여, 유한요소해석법으로 이의 부가구

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. (%)			
352		514		29			

Table 2 Probability of ρ and θ for specimens

		Probability of measured values		
		10%	50%	90%
Cruciform	ρ	0.87	2.19	3.54
	θ	29.5	36.9	44.5
Cover Plate	ρ	0.16	0.50	0.83
	θ	31.5	39.7	48.0
Longitudinal Stiffener	ρ	0.36	0.84	1.32
	θ	30.4	38.7	46.9

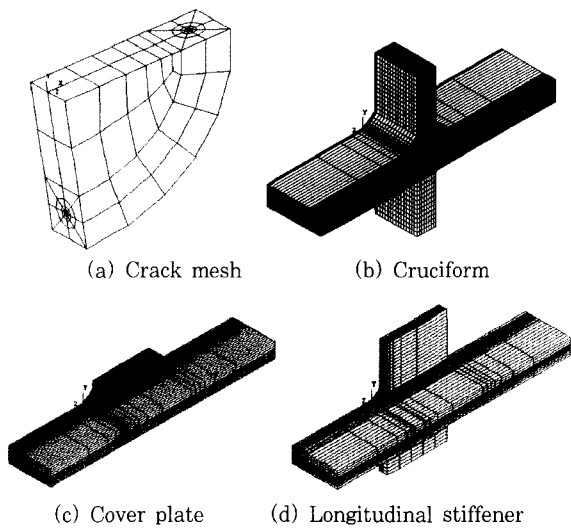


Fig. 2 Modeling of specimens with semi-elliptical surface crack

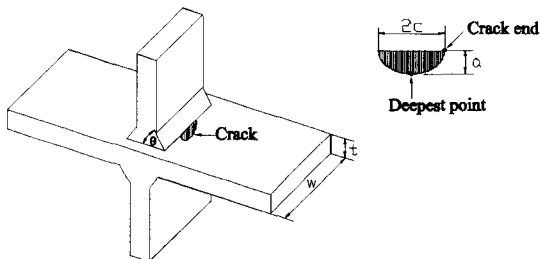


Fig. 3 Configuration of semi-elliptical surface crack

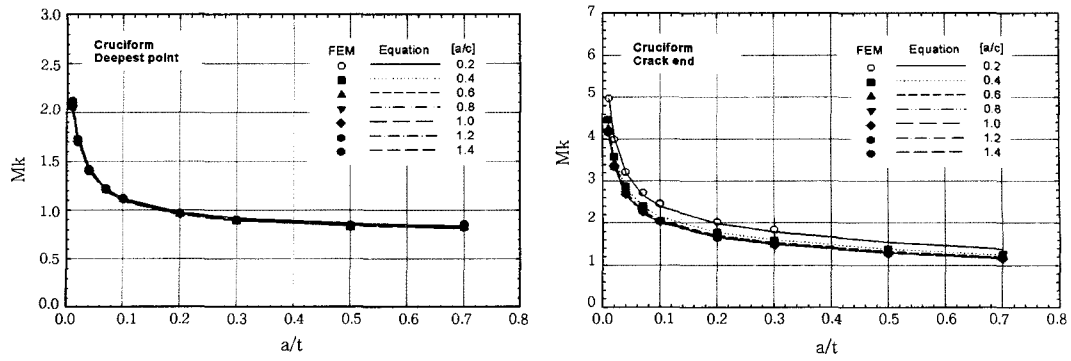
point)에서 얻어진다. 반복계산의 범위는 판두께에 대한 균열깊이비 a/t 의 경우 0.01~0.7이고, 균열형상

비 a/c 의 경우 0.2~1.4이다. 이 범위 내에서 자동적으로 균열이 모델링이 되도록 프로그램을 작성하였다. 용접비드의 θ 는 각 시험편에 대하여 Table 2와 같이 누적확률이 50%인 값으로 하였고, ρ 는 Mk -계수에 매우 적은 영향을 주는 것으로 알려져 있어⁹⁾ 노치반경을 고려하지 않고 $\rho=0$ 으로 하였다.

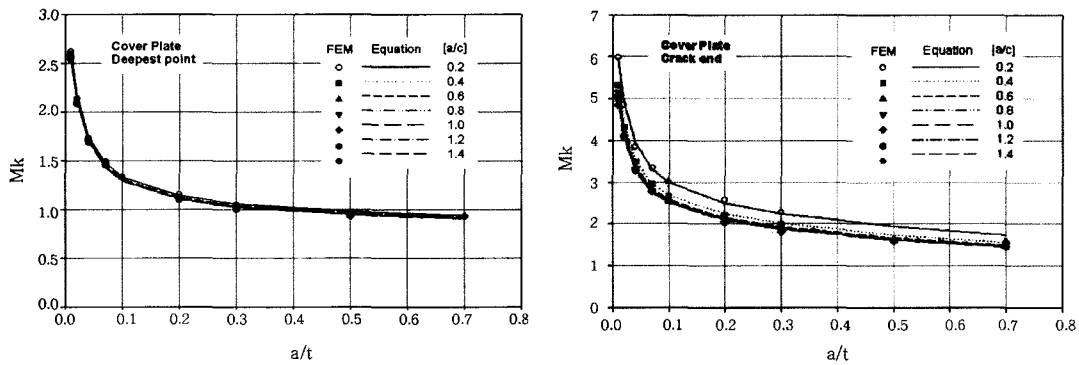
Fig. 4는 균열 끝단과 최심점에 대한 Mk -계수 계산 결과이다. 세 가지 시험편 모두 a/t 가 작을수록 부가 구조 및 용접비드의 영향이 크게 나타나 Mk -계수는 균열 끝단 및 최심점의 경우 크게 증가한다. 또한 균열 끝단의 Mk -계수는 최심점의 것에 비해 두 배 이상 큰 값을 보이고, a/t 가 커질수록 두 값의 차이는 점차 줄어든다. 이로부터 부가구조가 있는 용접부에서 진전하는 표면균열의 a/c 는 부가구조가 없는 것에 비하여 상대적으로 작은 값이 나타나는 현상¹⁾이 설명된다. 십자형 필릿용접 이음부의 경우에서만, 최심점의 Mk -계수는 Fig. 4(a)와 같이 $a/t > 0.2$ 범위에서 1 이하로 떨어져 응력확대계수의 상승효과를 반영하지 못한다. 인장하중 하에서의 균열은 열림과 동시에 상방향으로 변형이 일어나는데, 십자형 필릿용접 이음부처럼 부가구조물이 판쪽에 걸쳐 존재하게 되면 균열의 열림과 상방향으로의 자유로운 움직임은 부가구조물에 의해 구속되어 응력확대계수를 감소시키는 결과를 가져오기 때문이다. a/c 에 대한 Mk -계수의 영향은 최심점의 경우 세 가지 시험편 모두 거의 찾아보기 힘들다. 이에 대하여, 균열 끝단의 경우 a/c 가 0.2와 0.4사이에서 Mk -계수가 큰 변화를 보이나, a/c 가 0.6이상에서는 이 변화가 사라진다.

Fig. 5는 Fig. 4의 결과 중 $a/c=0.8$ 에 대한 균열 최심점 및 끝단에서의 Mk -계수를 각 시험편 별로 비교한 것이다. 십자형 필릿용접 이음부의 Mk -계수가 가장 작고, 종방향 거셋 용접이음부에서 가장 큰 Mk -계수가 얻어진다. 이는 동일한 크기의 균열에 대하여 선단에 작용하는 응력확대계수 K_I 이 종방향 거셋 용접이음부가 가장 크다는 의미로, 피로균열진전 측면에서 가장 짧은 수명이 나타난다. 실제 각종 Code¹⁰⁻¹²⁾에서 피로강도는 십자형 필릿, 커버 플레이트 그리고 종방향 거셋 용접이음부 순으로 높다고 보고되고 있다.

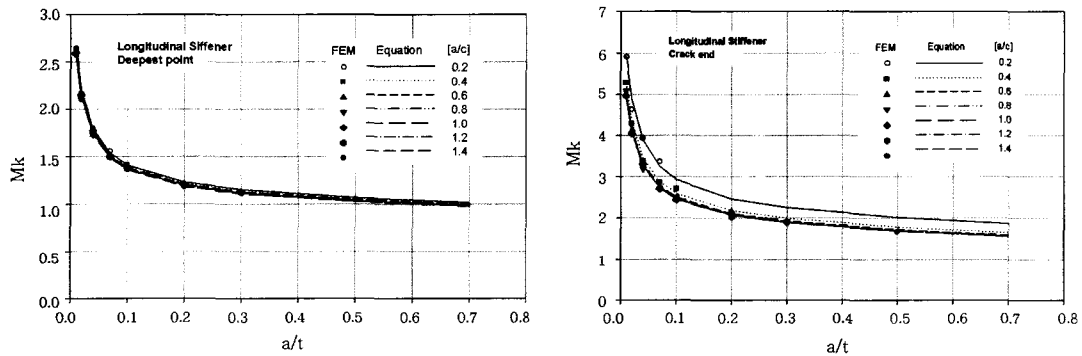
a/c 와 a/t 에 대한 Mk -계수 계산식은 Fig. 4의 계산결과를 피팅(fitting)하여 구할 수 있다. 이 때 적용된 함수식은 식(2)와 같으며, 피팅계수 $A \sim G$ 는 Table 3과 같다.



(a) Cruciform joint



(b) Cover plate joint



(c) Longitudinal stiffener joint

Fig. 4 Mk -factor at deepest point and crack end for welded joints

Table 3 Fitting coefficients of Mk -equation for welded joints

Fitting Coeff.	Cruciform		Cover plate		Longitudinal stiffener	
	Crack end	Deepest point	Crack end	Deepest point	Crack end	Deepest point
<i>A</i>	4.1604	2.0513	4.9882	2.5226	4.9652	2.4705
<i>B</i>	2.3039	0.0917	2.6852	0.1405	3.1692	0.1899
<i>C</i>	5.1875	1.3577	5.0231	1.7642	6.0617	0.4521
<i>D</i>	1.4521	2.8483	1.4295	1.3335	1.3840	1.3757
<i>E</i>	27.3836	49.0783	28.8520	18.5551	21.8889	25.7221
<i>F</i>	72.3167	60.0267	71.1845	51.9361	60.1812	62.9703
<i>G</i>	45.1885	4.8892	49.0985	5.2475	20.2539	10.9013

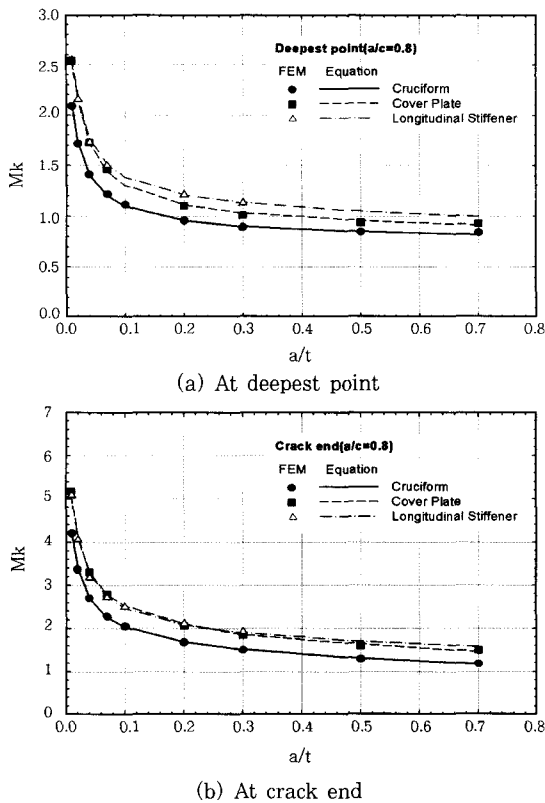


Fig. 5 Comparison of Mk -factors of welded joints

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

3. 복수 표면균열의 피로균열진전 평가

3.1 복수 표면균열의 간섭조건

3차원 복수 표면균열의 간섭조건은 Murakami¹³⁾와 Nemat-Nasser¹⁴⁾에 의하여 제안된 체적력범이 가장 일반적이다. 그러나, 계산방법이 매우 복잡하고 일관된 해를 주고 있지 못하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 Murakami와 Nemat-Nasser가 제안한 간섭조건을 주 간섭조건으로 하고, 2차원 관통균열에 대한 간섭이론을 3차원 표면균열의 간섭으로 보정한 방법인 Yuuki-Yoshida의 수정식¹⁵⁾을 적용하여, 간섭을 받는 3차원 복수 표면균열의 응력확대계수 ($K_{I_{3D}}$)를 다음식과 같이 구하였다.

$$(K_{I_{3D}}) = \sigma_t \sqrt{\pi a} \{1 + r_m(F_{2D} - 1)\} F_{Fett} \quad (3)$$

여기서, σ_t = 축하중 응력성분, a = 균열길이,

r_m = 2차원 균열의 3차원 효과에 대한 보정 계수(실험상수),

$$F_{2D} = (K_I)_{2D, multi} / (K_I)_{2D, single}$$

: 2차원 복수 관통균열에 대한 간섭계수

$$F_{Fett} = \text{형상보정계수}^{16)}$$

부가구조물이 부착된 용접이음부의 3차원 복수 표면균열의 응력확대계수는 최외곽에 위치한 균열끝단의 경우와 인접한 균열간의 간섭을 고려한 경우에 대하여 식 (1) 및 (3)으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{최외곽 균열} : (K_I)_{3D} = Mk \sigma_t \sqrt{\pi a} F_{Fett} \quad (4)$$

$$\text{인접 균열} : (K_I)_{3D} = Mk \sigma_t \sqrt{\pi a} F_{Yuuki} F_{Fett} \quad (5)$$

3.2 복수 표면균열의 합체조건

복수균열이 각기 성장하여 인접균열 간 간격이 어느 일정 크기에 도달되면 서로 합체가 일어난다. 균열의 합체조건을 인접균열 간의 간격 δ_o 으로 판단하는데, 본 연구에서는 균열선단 표면점 간 연결조건^{4,6,10)}, 즉 $\delta_o = 0$ 을 만족하였을 때 복수 표면균열이 서로 합체되었다고 판단하였다. 균열의 합체가 순간적으로 이루어진다는 가정 하에 합체 이후의 균열을 재정의^{4,6)} 해야 하는데, 이 때 균열길이 a 는 두 균열 중 더 큰 것으로 선택하였으며, 균열길이 $2c$ 는 합체된 두 균열길이의 합으로 하였다.

3.3 피로균열진전 해석

용접부 복수 표면균열 피로해석을 위한 전산 프로그램은 Mk -계수의 계산, 인접균열간의 간섭효과, 합체조건 및 합체 후 균열의 재정의 과정으로 Fig. 6과 같이 구성하였다. 이를 통해 용접비드 선단에 불규칙하게 분포하는 표면균열의 수, 위치 및 형상에 대한 정보가 주어지면 균열진전 거동을 전산모사 할 수 있으며, 피로균열 진전수명 평가가 가능하다.

균열진전해석을 위하여 Paris식이 이용되었다. 본 연구에 적용된 소재에 대한 Paris식은 반원형 표면균열 ($a/c=1$, $a=1.5\text{mm}$)이 가공된 평활시험편($80 \times 40 \times 10\text{mm}$: 표점길이×폭×두께)에 대한 응력비 $R=0.1$ 인 피로시험으로 얻어졌으며, 그 결과는 다음과 같다.

$$da/dN = 5.85 \times 10^{-13} \Delta K^{3.82} \quad (6)$$

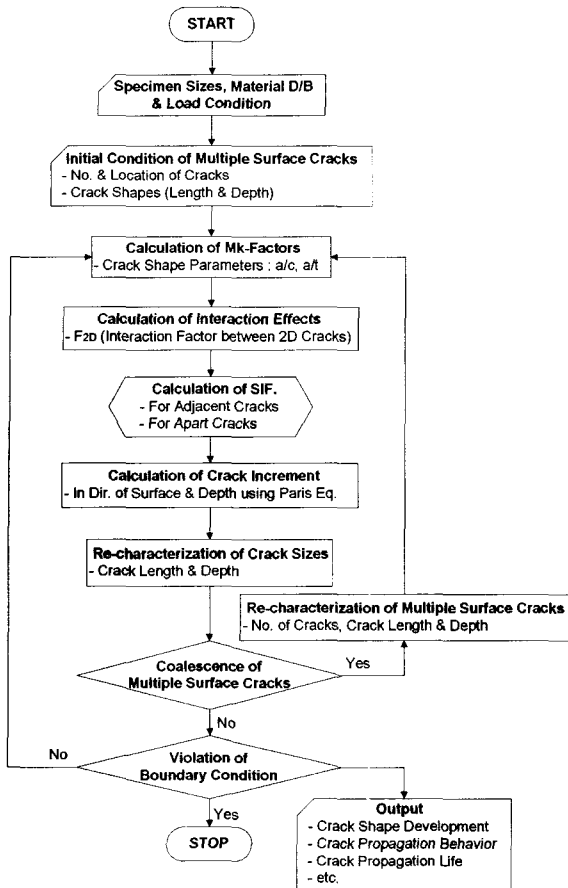


Fig. 6 Fatigue analysis workflow of multiple surface cracks in welded joints

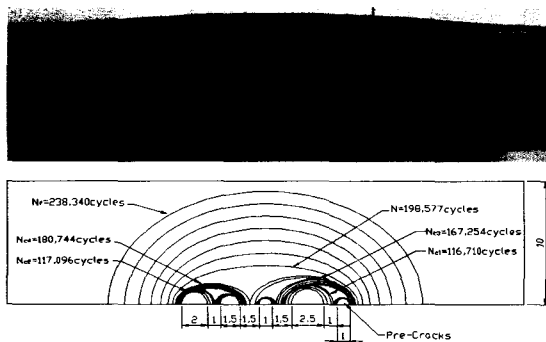


Fig. 7 An example of experimental and predicted fatigue crack propagation behaviour for 5 multiple surface cracks

$$dc/dN = 9.55 \times 10^{-13} \Delta K^{3.59} \quad (7)$$

여기서, da/dN : m/cycles, ΔK : $MP\sqrt{m}$

한편, 식(3)의 간섭조건을 고려한 응력확대계수 계산식에서 사용된 실험상수인 2차원 균열의 3차원 효과에 대한 보정계수 r_m 은 Fig. 7과 같은 균열개수, 크기 및 위치가 서로 다른 다양한 평활시험편에 대한 피로시험을 통해 실험결과와 해석치의 오차가 최소로 되는 값

을 선정하였으며, 이는 0.2로 얻어졌다.

3.4 십자형 필릿용접 이음부의 피로수명 평가

복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장 기구와 용접이음부에 대한 Mk -계수를 이용한 피로균열 진전거동 모사기법을 십자형 필릿용접 이음부에 적용하였다. 이때, 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 개수, 크기 및 위치를 모두 고려하였다.

십자형 필릿용접 이음부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 분포를 얻기 위하여 Fig. 1(a)의 시험편에 대하여 Fig. 8과 같은 시험설치 하에 피로시험을 실시하였다. MTS사의 100ton 용량 유압가력기를 사용하여 정현파형의 일정진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비 R 및 하중 주파수는 각각 0.1, 10Hz로 하였다.

피로시험 중 염료투입법을 실시하였고, 실험 종료 후 파면분석을 통하여 염료투입 시점에서의 복수 표면균열의 크기와 위치를 계측하였다. 총 7개 시험편에서 얻어진 피로시험 결과를 Table 4에 정리하였다. 염료투입 시점 N_D 는 시험편 파단수명 N_T 에 대하여 27~61%에 해당하며, 이때 관측된 균열개수는 1~6개로 시험편간에 차이가 심하였다. 균열깊이 a 및 균열길이 $2c$ 는

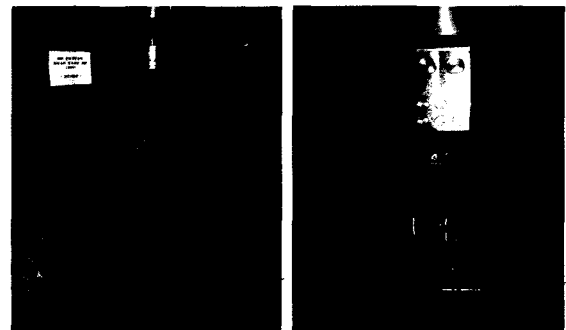


Fig. 8 Experimental set-up for cruciform joint

Table 4 Fatigue test results for cruciform welded joint

Specimen	$\Delta\sigma$ (MPa)	No. of Crack	$N_T - N_D (\frac{N_D}{N_T})$
#1	150	2	982634 (0.42)
#2	220	3	268387 (0.36)
#3	275	2	93591 (0.27)
#4	175	6	120720 (0.61)
#5	140	6	490147 (0.59)
#6	200	6	183284 (0.35)
#7	120	1	1798317 (0.50)

* N_T =total fatigue life

N_D =fatigue life when performing dye penetration

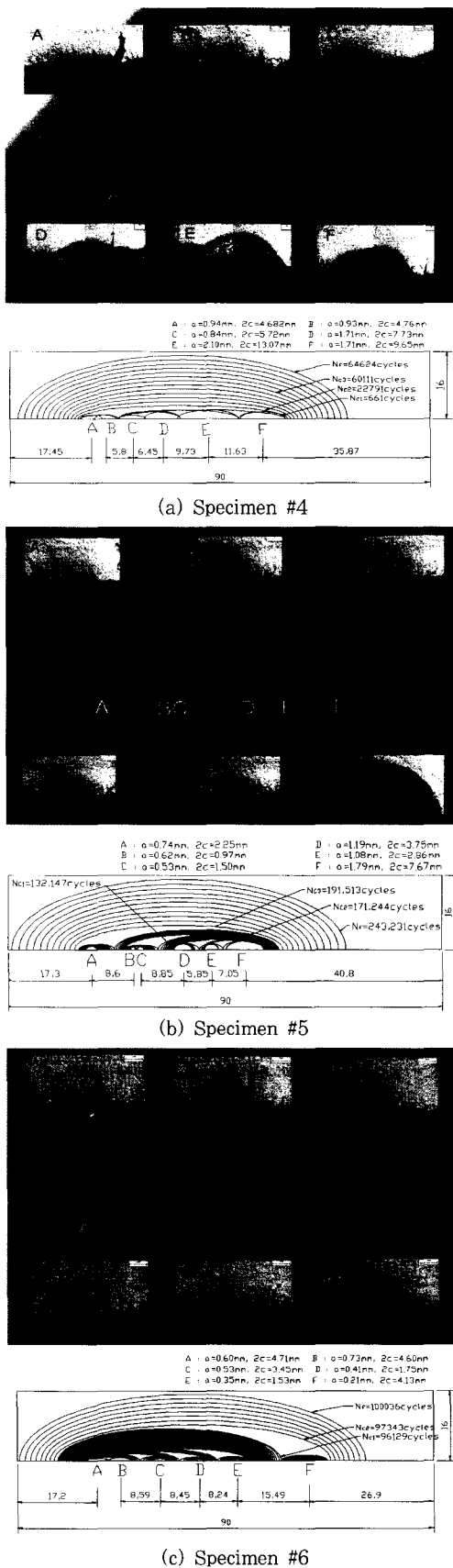


Fig. 9 Fractography and simulation of crack propagation

각각 0.14~5.45mm 및 0.51~10.03mm로 계측되었다. Fig. 9는 7개의 시편 중 대표적으로 시편 #4, #5 및 #6의 계측된 복수 표면균열 모습 및 Fig. 6의 피로균열진전해석을 적용하여 이를 모사한 예이다. 여기서, 관측된 표면균열의 수는 세 시험편 모두 6개로서 각각의 계측된 표면균열의 크기 및 위치 자료로부터 염료투입 시점부터 최종파단까지의 반복수 $N_T - N_D$ 를 추정할 수 있다. Fig. 10은 모든 시편에 대하여 추정된 피로수명 $N_T - N_D$ 를 Table 4의 실험결과와 비교한 결과이다. 추정된 피로수명이 실험치를 계수 2 편차 이내의 안전측 결과를 보여주고 있다.

3.5 고찰

용접이음부의 피로균열 진전거동은 용접비드 선단에 분포하는 용접잔류응력에 영향을 받는다. 용접잔류응력의 영향을 살펴보기 위하여 본 연구에 적용된 십자형 필릿용접 이음부에 대한 잔류응력을 측정하였으며, 외응력에 의한 잔류응력 이완특성과 평균응력 변화를 고려한 피로균열 진전수명을 평가하여 이를 잔류응력을 고려하지 않은 Fig. 10의 결과와 비교하였다.

피로시험에 적용된 십자형 필릿용접 이음부 용접비드 선단에 작용하는 용접잔류응력은 단면절단법을 통하여 얻어졌으며, 시험편 폭방향으로 계측된 초기 잔류응력 분포는 Fig. 11과 같다. 초기 잔류응력은 Table 4의 공칭응력범위 최대값에 대한 비드선단의 노치응력 크기를 기준으로 이완된다. 이완기구와 모델은 저자 등¹⁷⁾의 실험자료를 따른다고 가정하였고, 공칭응력범위 크기에 대한 이완된 잔류응력 분포식은 Fig. 11과 같이 얻어진다.

피로하중에 의해 이완되는 용접잔류응력과 외응력은 서로 중첩되고, 이를 통한 평균응력 변화는 균열 선단에 작용하는 유효응력확대계수 ΔK_{eff} 변화를 야기한다.

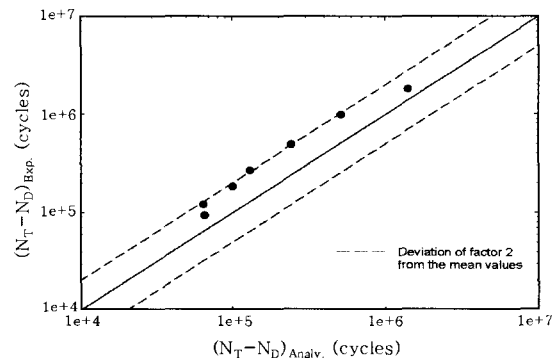


Fig. 10 Comparison of crack propagation life for cruciform joint

Katoh 등¹⁸⁾은 구조용 강재에 대하여 $-5 \leq R$ (응력비) ≤ 0.8 범위에 대한 피로균열진전 자료를 조사하여 균열 진전속도 da/dN 을 다음 식과 같은 형태로 제시하였다.

$$\begin{aligned} da/dN &= C_{eff,a} \cdot (\Delta K_{eff,a})^{m_a} \\ dc/dN &= C_{eff,c} \cdot (\Delta K_{eff,c})^{m_c} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서, $\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$

$$\begin{aligned} U &= \frac{1}{1.5 - R} && : R \leq 0.5 \\ &= 1 && : R > 0.5 \end{aligned}$$

C_{eff} 및 m 에 사용된 아래첨자 a 와 c 는 각각 균열 깊이 및 균열길이 성분을 의미하며, $C_{eff,a}$ 및 $C_{eff,c}$ 는 식(6) 및 (7)의 실험결과로부터 각각 2.12×10^{-12} , 3.20×10^{-12} 으로 얻어지고, m_a 와 m_c 는 3.82 및 3.59이다. Fig. 11과 식(8)을 적용하여 십자형 필릿 용접 이음부의 피로균열 진전수명을 재평가하였다. Fig. 12는 이의 결과이다. 이때, 균열면에서 잔류응력은 작용하지 않고, 균열과 균열사이에서는 잔류응력이 모두 이완된다고 가정하였다. 계산된 피로수명은 잔류

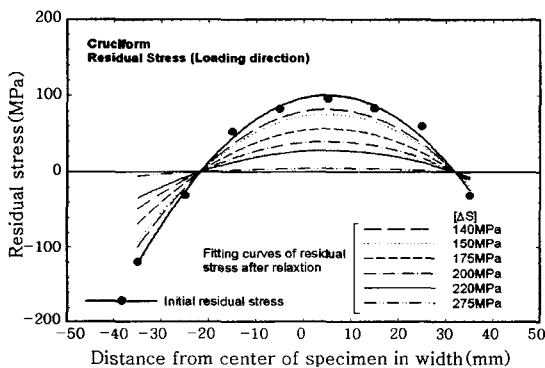


Fig. 11 Distribution of initial and relaxed residual stress

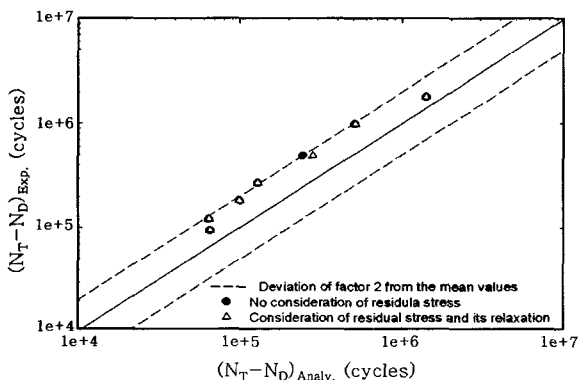


Fig. 12 Crack propagation life for cruciform joint with and without consideration of residual stress

응력을 고려하지 않은 것과 거의 유사한 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 용접비드 선단에 분포한 초기 용접잔류응력이 비드 선단에 작용하는 노치응력과 복수 표면균열의 발생 및 진전과 더불어 이완 또는 해방되는 특성으로 기인한다 볼 수 있다. 현재 진행 중인 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접이음부에 대한 피로시험의 결과가 얻어지면, 용접잔류응력에 대한 피로균열진전수명 영향을 보다 면밀히 분석할 수 있으리라 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 가장 널리 사용되고 있는 세 가지 용접 구조상세에 대하여 Mk -계수 계산식을 도출하였고, 십자형 필릿용접 이음부에 대하여 실험 및 이론적으로 얻어진 피로균열진전 수명을 비교, 분석하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- 1) 십자형 필릿, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접 이음부의 부가구조, 용접비드 형상 및 표면 균열형상을 고려한 파라미터 연구를 통해 Mk -계수 계산식을 도출하였다.
- 2) 세 용접 이음부 모두 Mk -계수는 a/t 가 작을수록 균열 끝단 및 최심점 경우 모두 크게 증가하며, a/c 에 대한 영향은 최심점의 경우 거의 없고, 끝단의 경우 a/c 가 0.2와 0.4사이에서 Mk -계수가 큰 변화를 보이나, a/c 가 0.6이상에서는 이 변화가 사라진다.
- 3) 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장이론은 Yuuki의 수정식 및 표면점 간 연결방법을 적용하였으며, 실험을 통하여 간섭계수 r_m 은 0.2로 얻어졌다.
- 4) 실험적으로 얻어진 십자형 필릿용접 이음부 비드 선단에 발생한 복수 표면균열의 크기 및 분포로부터 피로수명을 예측하였으며, 이 결과는 실험치를 계수 2 편차 이내로 모사하였다.

후 기

본 연구내용은 과학기술부 국가지정연구실과제인 “대형용접구조물의 피로수명예측기술개발”의 일부로 연구 수행에 지원을 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 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)
2. S.H. Chung, J.K. Lim and J.K. Lee : A Study on Crack

- Growth Behaviour of the Surface Crack in Weld HAZ for Steel(I), Journal of KWS, **6-2** (1988), 30-39 (in Korean)
3. 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)
 4. 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)
 5. D. Radaj and C. Sonsino : Fatigue Assessment of Welded Joints by Local Approaches, Abington Publishing, Cambridge, England (1998)
 6. C.M. Suh, N.S. Hwang and M.K. Park : Fatigue Crack Growth, Coalescence Behaviour and its Simulation on Multi-Surface Cracks, Trans. of KSME, **18-3** (1994), 716-728 (in Korean)
 7. S.M. Cho, J.H. Kim and Y.S. Kim : A Model estimating the Fatigue Crack Growth in Aluminum Alloy A5083-O considering the Effect of Stress Concentration, Journal of KWS, **12-3** (1994), 90-100 (in Korean)
 8. BS 7910 : Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, British Standard (1999)
 9. D. Browness 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
 10. JSSC : Guideline of Fatigue Design in Steel Construction, Japan Society of Steel Construction (1993)
 11. BS 5400 : Steel, concrete and composite bridges, Part10. Code of Practice for Fatigue, British Standard Institution (1980)
 12. Euro Code 3 : Design of Steel Structures concerning Fatigue, ENV 1993-1-1 (1992)
 13. Y. Murakami and H. Nisitani : Stress Intensity Factor for Interacting Two Equal Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension, JSME Ser. A, **50** (1981), 295-303
 14. S. Nemat-Nasser : Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending, Engng. Frac. Mech., **16** (1982) 373-386
 15. R. Yuuki and T. Yoshida : Fatigue Life Prediction System for Structures, Journal of High Pressure Institute, **24-3** (1986), 115-123 (in Japanese)
 16. T. Fett : An Extension of the Newman-Raju Formula, International Journal of Fracture, **33** (1987), R47-R50
 17. S.H. Han and B.C. Shin : Prediction Model for Relaxation of Welding Residual Stress under Fatigue Load, Journal of KWS, **20-3** (2002), 340-346 (in Korean)
 18. A. Katoh, M. Kurihara and M. Kawahara : Analysis on Fatigue Crack Growth Rates under a Wide Range of Stress Ratios, Journal of Pressure Vessel Technology, **108** (1986), 209-213