

# 십자형 필렛용접 이음부의 복수균열 진전수명 평가

한정우<sup>†</sup> · 한승호\* · 신병천\* · 김재훈\*\*

(2004년 3월 31일 접수, 2004년 8월 9일 심사완료)

## Fatigue Life Estimation of Cruciform Welded Joint Considering Multiple Collinear Surface Cracks

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

**Key Words:** Fatigue Life(피로수명), Multiple Surface Crack(복수 표면균열), Mutual Interaction(상호 간섭), Coalescence(합체), Cruciform Welded Joint(십자형 필렛용접 이음부)

### Abstract

Fatigue life of welded joints is governed by the propagation of multiple collinear surface cracks distributed randomly along weld toe. These cracks propagate under the mechanisms of mutual interaction and coalescence of the adjacent two cracks. To estimate the fatigue life, its influences on the above two mechanisms should be taken into account, which appear through the stress intensity factors disturbed mutually. However, it is difficult to calculate the stress intensity factors of the multiple surface cracks located in vicinity of weld toe due to its geometrical complexity. They are calculated normally by using the  $Mk$ -factors, but such  $Mk$ -factors are very rare in literature. In this study, the  $Mk$ -factors were obtained from a parametric study on crack length and depth, for which a finite element method is used. A fatigue test for a cruciform welded joint was conducted and the fatigue life of the tested specimen was estimated using the present method with the informations obtained from the test, such as the number, size, and locations of the cracks. The estimated and measured fatigue life showed a good agreement.

### 1. 서 론

플랜트 설비, 교량 및 수송기계 등과 같은 대형 용접구조물의 경우, 이미 설계 수명에 육박하였거나 또는 사용조건이 더욱 가혹해져 주요부재의 피로파손 사례가 보고 되고 있다. 대부분의 피로파손은 용접비드(weld bead)선단에 발생하는 복수 표면균열에서 시작된다. 이는 균열간의 간

섭, 합체 및 성장 기구<sup>(1~3)</sup>를 통해, 부재의 두께 방향으로 진전하고 부재를 관통하면서 구조성능을 급격히 저하시킨다. 복수 표면균열은 용접비드 선단의 기하학적인 불연속부에서 발생한다. 공학적으로 측정이 용이한 표면균열 깊이 0.3~0.4mm를 기준으로 부재를 관통 할 때까지의 수명은 외부하중 조건에 따라 차이는 있지만, 전체 피로수명의 60~70% 이상을 차지한다.<sup>(4,5)</sup> 이러한 이유로 대형 용접구조물의 수명평가를 위해 피로균열진전수명 평가에 대한 연구가 요구되고 있다.

용접부에 발생하는 표면균열은 비드 선단을 따라 불규칙하게 분포하며, 또한 발생한 균열의 크기 및 형상비도 다양한 양상을 띠고 있다. 지금까지 복수 표면균열의 연구는 주로 단면형상이

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국기계연구원 구조연구부  
E-mail : jwhan@kimm.re.kr  
TEL : (042)868-7432 FAX : (042)868-7418  
\* 회원, 한국기계연구원 구조연구부  
\*\* 회원, 충남대학교 기계설계공학과

일정한 평활재에 대한 것<sup>(2-4)</sup>으로 국한되어 있어, 실제 용접구조와 같이 복잡한 형상을 갖는 경우 실용적인 적용에 어려움이 따랐다. 따라서, 용접구조물의 복수 표면균열 진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구를 고려하는 것은 물론, 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가 구조(attachment) 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력강도계수 상승분 *Mk-factor*(weld toe magnification factor)<sup>(6,7)</sup>를 고려해야 한다.

본 연구에서는 용접 구조상세 중 대표적인 십자형 필렛용접 이음부를 선정하여 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장 기구와 *Mk-factor*를 적용하고, 실제 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 위치분포를 고려한 피로균열진전수명을 평가하였다.

2. 복수 표면균열의 피로균열진전 평가

2.1 단일 표면균열에 대한 응력강도계수

Fig. 1과 같이 단면형상이 일정한 평활재의 3차원 표면균열에 대한 응력강도계수의 해는 Newman-Raju식<sup>(8)</sup>이 가장 광범위하게 활용되고 있으며, 이후 종전에 적용범위(0 ≤ a/c ≤ 1)를 0 ≤ a/c ≤ 2로 확장한 식 (1)과 같은 Fett식<sup>(9)</sup>이 적용되고 있다. 본 연구에서는 Fett식을 활용하여 a/c가 1 이상인 균열형상에 대해서도 적용할 수 있도록 하였다.

$$(K_I)_{3D} = \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} F_{Fett}(a/t, a/c, c/b, \phi) \quad (1)$$

여기서, a = 균열깊이, c = 균열길이의 1/2  
 t = 두께, b = 폭의 1/2, φ = 균열면각  
 σ<sub>t</sub> = 축하중 응력성분,  
 Q = 균열형상계수<sup>(9)</sup>,  
 F<sub>Fett</sub> = 형상보정계수<sup>(9)</sup>

2.2 간섭을 고려한 복수 표면균열의 응력확대 계수

3차원 복수 표면균열의 간섭조건은 Murakami<sup>(10)</sup>와 Nemat-Nasser<sup>(11)</sup>에 의하여 제안된 체적력법이 가장 일반적이다. 그러나, 계산방법이 매우 복잡하고 일관된 해를 주고 있지 못하는 단점을 갖고 있다. 본 연구에서는 Murakami와 Nemat-Nasser가

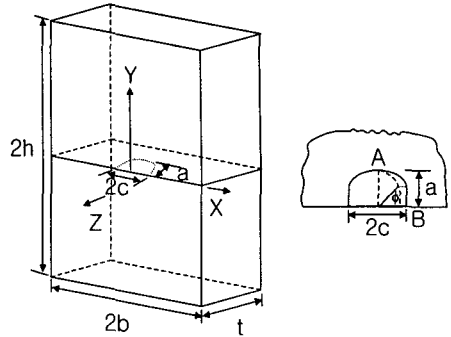


Fig. 1 Surface crack in plane plate

제안한 간섭조건을 주 간섭조건으로 하고, 2차원 관통균열에 대한 간섭이론을 3차원 표면균열의 간섭으로 보정한 방법인 Yuuki-Yoshida의 수정식<sup>(12)</sup>을 적용하여, 간섭을 받는 3차원 복수 표면균열의 응력강도계수 (K<sub>I</sub>)<sub>3D</sub>를 식 (2)와 같이 구하였다.

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

여기서, r<sub>m</sub> = 2차원 균열의 3차원 효과에 대한 보정계수(실험상수)

F<sub>2D</sub> = (K<sub>I</sub>)<sub>2D,multi</sub> / (K<sub>I</sub>)<sub>2D,single</sub> : 2차원 복수 관통균열에 대한 간섭계수

(K<sub>I</sub>)<sub>2D,single</sub>는 인장응력을 받는 무한평판에 놓인 2차원 관통균열에 대한 응력강도계수이고, (K<sub>I</sub>)<sub>2D,multi</sub>는 Fig. 2에서 보는 바와 같이 일직선 상에 놓인 두개의 관통균열에 대한 인접균열 선단 A와 B위치에 작용하는 응력강도계수를 의미하며, 이는 다음식과 같이 구할 수 있다.

$$(K_I)_{2D,multi,A} = \sigma \sqrt{\frac{\pi(b-d)}{2(a-b)(b-c)}} \cdot [(a-b) - (a-c) \cdot \{1 - \frac{E(k)}{K(k)}\}] \quad (3)$$

$$(K_I)_{2D,multi,B} = \sigma \sqrt{\frac{\pi(a-c)}{2(b-c)(c-d)}} \cdot [(c-d) - (b-d) \cdot \{1 - \frac{E(k)}{K(k)}\}] \quad (4)$$

여기서,  $k = \sqrt{\frac{(a-b) \cdot (c-d)}{(a-c) \cdot (b-d)}}$

$E(k), K(k) = 1, 2$  중 완전타원적분

인접균열 선단 A와 B위치에서의 간섭계수  $F_{2D,A}$ 와  $F_{2D,B}$ 는 식 (2)에 표현된  $F_{2D}$ 의 정의로부터 식 (5)와 (6)과 같이 구할 수 있으며, 이 식을 식 (2)에 대입함으로써 3차원 복수 표면균열에서의 응력강도계수  $(K_I)_{3D}$ 를 계산할 수 있다.

$$F_{2D,A} = \frac{(K_I)_{2D,multi,A}}{(K_I)_{2D,single,A}} = \sqrt{\frac{(b-d)}{(a-b)^2(b-c)}} \cdot [(a-b) - (b-c) \cdot \{1 - \frac{E(k)}{K(k)}\}] \tag{5}$$

$$F_{2D,B} = \frac{(K_I)_{2D,multi,B}}{(K_I)_{2D,single,B}} = \sqrt{\frac{(a-c)}{(b-c)(c-d)^2}} \cdot [(c-d) - (b-d) \cdot \{1 - \frac{E(k)}{K(k)}\}] \tag{6}$$

2.3 복수 표면균열의 합체조건

복수균열이 각기 성장하여 인접균열 간 간격이 어느 일정 크기에 도달되면 서로 합체가 일어난다. ASME<sup>(13)</sup> 및 BSI Code<sup>(14)</sup>에서는 균열의 합체조건을 인접균열 간의 간격  $\delta_0$ 로 결정하고 있다. 본 연구에서는 균열선단 표면점 간 연결조건, 즉  $\delta_0 = 0$ 을 만족하였을 때 복수 표면균열의 합체조건으로 적용하였다. 균열의 합체가 순간적으로 이루어진다는 가정하에 합체 이후의 균열을 재정의 하였다. 이 때 균열깊이  $a$ 는 두 균열 중 더 큰 것으로 선택 하였으며, 균열길이  $2c$ 는 두 균

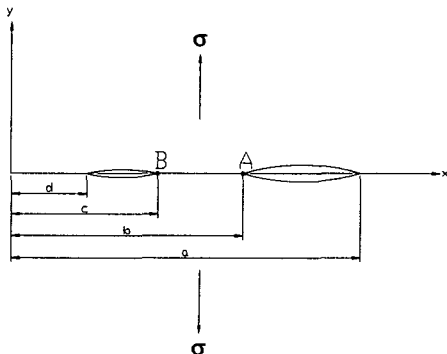


Fig. 2 Interaction of adjacent two cracks

열깊이의 합으로 하였다.

2.4 복수 표면균열의 피로물성치 평가

복수 표면균열의 간섭 및 합체조건을 적용을 위하여 단일표면균열의  $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$  관계와 식 (2)의 간섭계수  $r_m$ 을 실험적으로 구해야 한다. 이를 위하여, Table 1과 같은 일반 용접 구조용 강재로 널리 사용되고 있는 SM490B을 이용하여 피로시험을 실시하였다. 피로시험에 사용된 시험편은 Fig. 3과 같은 평활재로서 80x40x10mm (평행부길이×너비×두께)의 크기를 가지며, 시편 중앙부에 방전가공을 통해 지름 3mm의 반원형 노치를 도입하였다. 피로시험은 MTS사의 25ton 용량 유압가력기를 이용하였다. 정현파형의 일정진폭하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비  $R(=P_{min}/P_{max})$ 은 0.1로 고정하였으며, 하중 주파수는 10Hz로 하였다.

Fig. 4는 단일 표면균열에 대한 피로실험 결과이며,  $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$  관계는 Paris식의 형태로 표현하였고, 각각의 실험상수를 그림 중에 기재하였다. 또한, 동일소재 및 ferrite-pearlite 계열의 강재에 대한 판통균열 실험결과도 같이 나타내었다. 내부균열의 형상을 측정하기 위하여 피로시험 도중 주기적으로 비치마크법이 도입되

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							
$\sigma_y$ (MPa)		UTS (MPa)		el. (%)			
352		514		29			

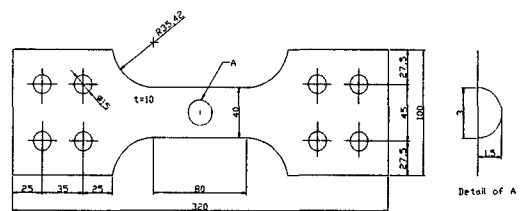


Fig. 3 Configuration of Specimen for crack propagation characteristic test

었고, 시험완료 후 파면해석을 통하여 이를 정량화 하였다.

간섭계수  $r_m$ 은 복수 및 단일 표면균열 피로실

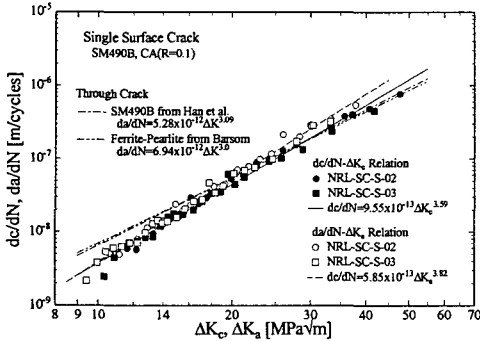
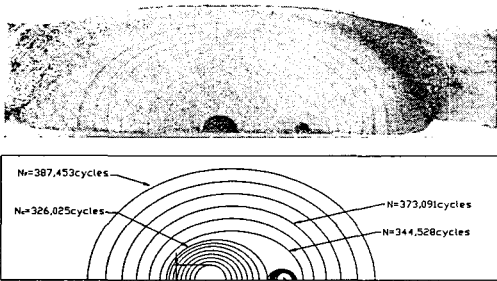
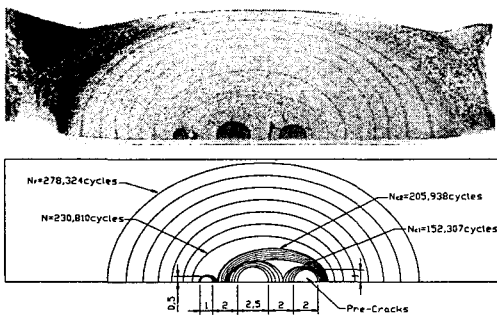


Fig. 4  $da, dc/dN - \Delta K_a, \Delta K_c$  curves of SM490B in case of single surface crack



(a) Number of crack : 2



(b) Number of crack : 3

Fig. 5 Comparison of experimental and simulated fatigue crack propagation shape for the multi-surface cracks

험 결과를 바탕으로 복수 표면균열의 간섭, 합체 이론을 적용한 피로수명 예측자료 간의 비교를 통해 구해진다. 피로시험은 표면균열의 수(2~5개), 크기 및 위치가 서로 다른 Fig. 3과 같은 평활재 시편 형상에 대하여 10종의 시험편을 준비하여 실시되었고, 이에 대하여 복수 균열의 합체시점 및 최종 파단 피로수명을 예측하였다. Fig. 5는 표면균열의 개수가 2 및 3개인 시험편에서 채취한 파면과 이를 예측한 해석자료를 비교한 결과의 예이다. 이를 통해 실험결과와 해석치의 오차가 최소로 되는 간섭계수  $r_m$ 은 0.2로 얻어졌다.

### 3. 십자형 필렛용접 이음부의 피로균열 진전수명 평가

#### 3.1 $Mk$ -factor 도입을 통한 응력강도계수 산정

용접구조물은 부가구조 및 용접비드에 의하여 응력집중이 크게 발생하며, 비드 선단에 발생한 균열에도 영향을 주어 국부적으로 응력강도계수를 변화시킨다. 이 경우 응력집중계수와 마찬가지로  $Mk$ -factor<sup>(6,7)</sup>를 도입하여, 용접부 부가구조 및 용접비드로 야기될 수 있는 응력강도계수 변화가 정량적으로 표현될 수 있다.  $Mk$ -factor는 용접 부가구조가 없는 평활시편에 대하여 부가구조가 있는 시편의 응력강도계수비로 다음 식과 같이 정의된다.

$$Mk = \frac{K_{I, \text{plate with attachment}}}{K_{I, \text{same plate with no attachment}}} \quad (7)$$

따라서, 용접구조물 비드 선단에 발생한 복수 표면균열의 인접한 균열에 대한 응력강도계수는 평활재에서 얻어진 식 (2)의 수정을 통해 아래 식을 이용하여 구할 수 있다.

$$(K_I)_{3D} = Mk \cdot \sigma_t \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \{1 + r_m (F_{2D} - 1)\} F_{Fett} \quad (8)$$

#### 3.2 $Mk$ -factor 계산식의 도출

용접구조물에서 균열발생이 예상되는 용접이음부의 형상이 결정되면,  $Mk$ -factor는 부가구조, 용접비드 및 표면균열의 형상에 의존하므로 파라미터 연구를 통하여  $Mk$ -factor 계산식을 도출해야

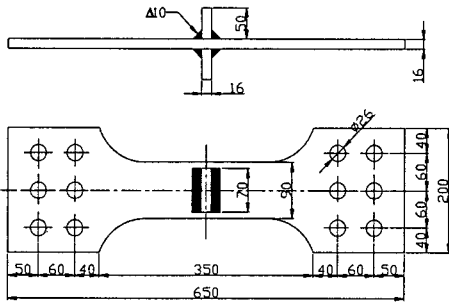
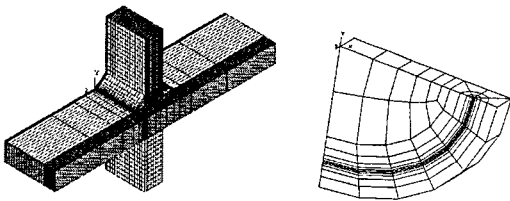
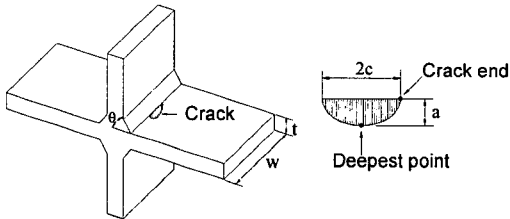


Fig. 6 Configuration of cruciform welded joint



(a) Modeling by using ANSYS



(b) Configuration of semi-elliptical surface crack

Fig. 7 Modeling and schematic diagram of semi-elliptical surface crack

한다. T-joint<sup>(7)</sup>와 Butt-joint<sup>(15)</sup>에 대한 2차원 및 3차원 균열에 대한  $Mk$ -factor 계산식은 제시되어 있으나, 본 연구에 사용된 십자형 필렛용접 이음부의 3차원 균열에 대한 계산식은 아직까지 발표되지 않고 있다. BS 7910<sup>(15)</sup>에서 제시하고 있는 십자형 필렛용접 이음부에 대한  $Mk$ -factor 계산식은 2차원 관통균열에 대한 것으로서 3차원 표면균열에 적용하기 곤란하다. 특히, 균열의 간섭이나 합체가 주로 표면방향의 균열끝단에서 일어난다는 것을 감안하면, 균열의 최심점뿐만 아니라 끝단에서의 응력강도계수를 모두 평가할 수 있는 3차원 모델링에 의한  $Mk$ -factor 계산식이 필요하다. 이를 통하여 실제 이음부에 존재하는 복수균열의 피로수명을 평가할 수 있다. 십자형 필

렛용접 이음부의 균열 최심점에 대하여 BS 7910<sup>(15)</sup>에서 제시한 2차원 모델링 결과와 본 논문에서 수행한 3차원 모델링에 의한  $Mk$ -factor 계산 결과를 비교하여 3.2절에 나타내었다.

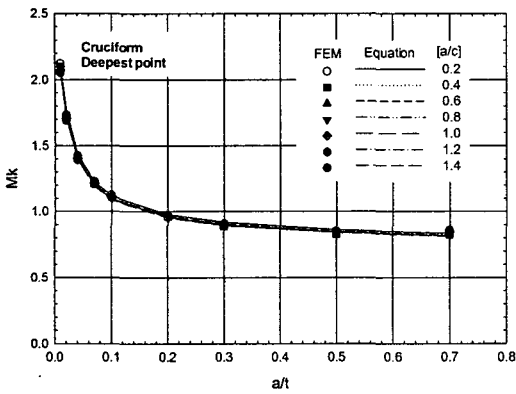
십자형 필렛용접 이음부의 형상은 Fig. 6과 같다. 용접비드 선단의 기하학적 형상은 대표적으로 노치반경  $\rho$  및 플랭크 각  $\theta$ 로 표현할 수 있고, 실리콘 플라스틱을 이용하는 비파괴측정법을 적용하여 이를 계측할 수 있다. 시험편의 치수, 제작공정 및 계측자료는 저자 등의 논문<sup>(16)</sup>에 상세히 언급되어 있으므로 이를 참조하기 바란다.

$Mk$ -factor의 파라미터 연구를 위한 반복계산은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 이루어졌다. 균열선단을 따라 특이요소를 생성시킨 3차원 solid 요소를 이용하였고, 균열선단을 따라 생성된 메쉬 크기는 균열길이  $c$ 의 1/32 배로서 ANSYS에서 추천하는 1/8배 이하를 만족한다. 용접이음부 형상의 좌우대칭을 고려하여 Fig. 7(a)와 같이 1/2만을 모델링하였다. 3차원 표면균열의  $Mk$ -factor는 Fig. 7(b)와 같이 균열 끝단 (crack end)과 최심점(deepest point)에서 얻어진다. 반복계산의 범위는 판두께에 대한 균열깊이비  $a/t$ 의 경우 0.01~0.7이고, 균열형상비  $a/c$ 의 경우 0.2~1.0이다. 이 범위 내에서 자동적으로 균열이 모델링이 되도록 프로그램을 작성하였다. 이때 용접비드의 플랭크 각  $\theta$ 는 기 측정된 용접형상 측정자료를 활용하여 누적확률이 50%인 42.5°으로 하였고,<sup>(16)</sup> 노치반경  $\rho$ 는  $Mk$ -factor에 매우 적은 영향을 주므로<sup>(7)</sup> 노치반경을 고려하지 않고  $\rho=0$ 으로 하였다. 하중은 십자형 필렛 용접이음부의 길이방향으로 인장이 작용하도록 하였다.

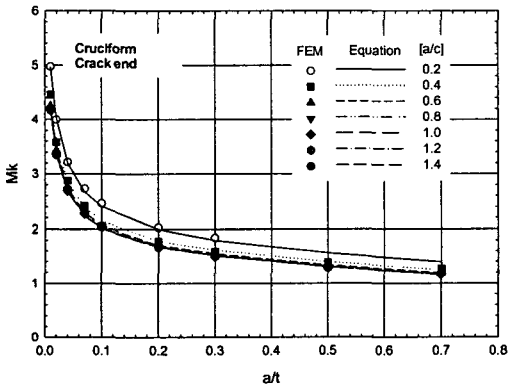
유한요소해석결과로부터 임의의 균열형상에 대한  $Mk$ -factor는 식 (7)로부터 구할 수 있다. Fig. 8은 균열 끝단과 최심점에 대한  $Mk$ -factor 계산 결과이다.  $a/t$ 가 작을수록 부가구조 및 용접비드의 영향이 크게 나타나  $Mk$ -factor는 균열 끝단 및 최심점 경우 모두 크게 증가한다.  $a/t=0.01$  ( $a/c=1.0$ )에서  $Mk$ -factor의 크기를 비교하면, 균열 끝단의 경우 2.1이고, 최심점의 경우 4.5로서 최심점에서 약 2배 정도 더 큰  $Mk$ -factor를 가진다. 반면,  $a/t$ 가 클수록 부가구조물에 의한 응력집중 효과는 감소하여  $Mk$ -factor는 점차 줄어든다. 최심점의 경우,  $a/t>0.2$  범위에서  $Mk$ -factor는 1 이하

**Table 2** Fitting coefficients of  $Mk$ -equation for cruciform welded joint

Fitting Coeff.	Cruciform	
	Crack end	Deepest point
<i>A</i>	4.1604	2.0513
<i>B</i>	2.3039	0.0917
<i>C</i>	-5.1875	-1.3577
<i>D</i>	1.4521	2.8483
<i>E</i>	27.3836	49.0783
<i>F</i>	72.3167	60.0267
<i>G</i>	45.1885	4.8892



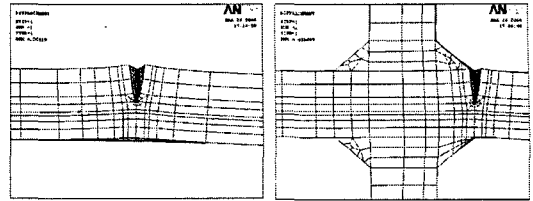
(a)  $Mk$ -factor at deepest point



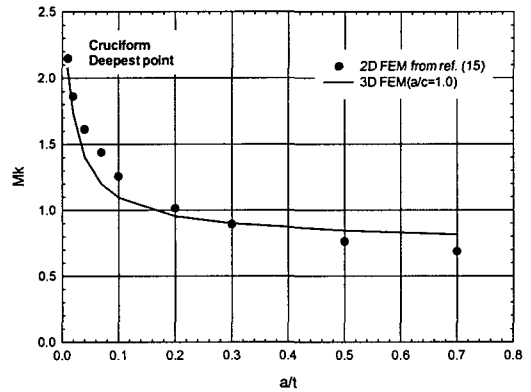
(b)  $Mk$ -factor at crack end

**Fig. 8**  $Mk$ -factor at deepest point and crack end for cruciform welded joint

로 떨어져 응력강도계수의 상승효과를 반영하지 못한다. 이는 인장하중하에서의 균열은 Fig. 9(a)와 같이 열립과 동시에 상방향으로 변형이 일어나는데, 부가구조물이 존재하게 되면 균열의 열



(a) Plane plate (b) Cruciform welded joint  
**Fig. 9** Deformed shape of plane plate and cruciform welded joint



**Fig. 10** Comparison of  $Mk$ -factors based on 2D and 3D FEM at deepest point for cruciform welded joint

립과 상방향으로의 자유로운 움직임은 Fig. 9(b)와 같이 부가구조물에 의해 구속되어 응력강도계수를 감소시키는 결과를 가져오기 때문이다.  $a/c$ 에 대한  $Mk$ -factor의 영향은 최심점의 경우 거의 찾아보기 힘들다. 이에 대하여, 끝단의 경우  $a/c$ 가 0.2와 0.4사이에서  $Mk$ -factor가 큰 변화를 보이나,  $a/c$ 가 0.6이상에서는 이 변화가 사라진다.

$a/c$ 와  $a/t$ 에 대한  $Mk$ -factor 계산식은 Fig. 8의 계산결과를 피팅(fitting)하여 구할 수 있다. 이 때 적용된 함수식은 식 (9)와 같으며, 피팅계수  $A \sim G$ 는 Table 2와 같다.

$$Mk = \{ A + B \cdot e^{-C \cdot (a/c)} \} \cdot \left\{ \frac{D + E \cdot (a/t)}{1 + F \cdot (a/t) + G \cdot (a/t)^2} \right\} \quad (9)$$

Fig. 10은 균열의 최심점에 대하여, BS 7910<sup>(15)</sup>의 2차원(2D FEM)과 식 (9)의 3차원 모델링(3D

Table 3 Fatigue test results for cruciform welded joint

Specimen	$\Delta\sigma$ (MPa)	No. of Crack	$N_T - N_D \left( \frac{N_T - N_D}{N_T} \right)^*$
#1	150	2	982634 (0.58)
#2	220	3	268387 (0.64)
#3	275	2	93591 (0.73)
#4	175	6	120720 (0.29)
#5	140	6	490147 (0.41)
#6	200	6	183284 (0.65)
#7	120	1	1798317 (0.50)

\*  $N_T$ =total fatigue life

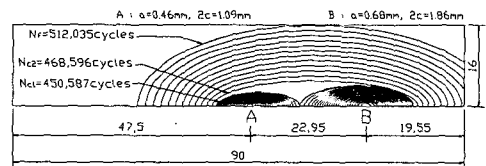
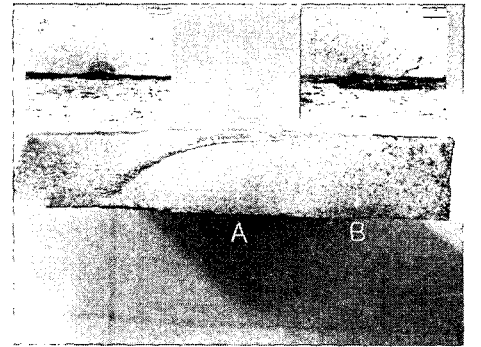
$N_D$ =fatigue life when performing dye penetration

FEM)에 의한  $Mk$ -factor 계산결과를 비교한 그래프이다.  $a/t < 0.3$  범위에서는 3차원에 비해 2차원의 계산결과가 더 크고,  $a/t > 0.3$  범위에서는 반대의 결과를 보이며, 그 차이는 약 20% 이내이다. 이와같은 결과는 3차원 균열을 2차원 균열로 단순화시켜  $Mk$ -factor를 계산할 경우,  $a/t < 0.3$  범위에서 과도하게 평가된  $Mk$ -factor로 인하여 실제의 경우보다 피로수명을 과소하게 평가될 수 있음을 예상할 수 있다.

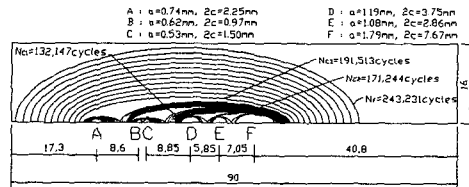
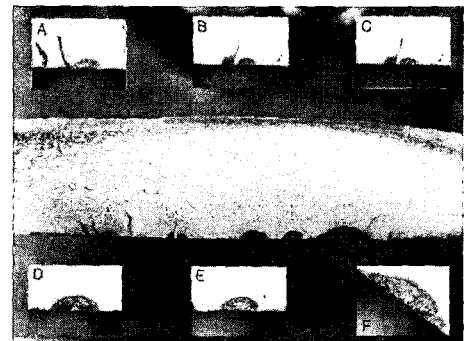
3.3 십자형 필렛용접 이음부의 수명평가

십자형 필렛용접 이음부 비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 분포를 얻기 위하여 Fig. 6의 시험편에 대하여 피로시험을 실시하였다. MTS사의 100ton 용량 유압가력기를 사용하여 정현파형의 일정한하중을 시험편에 가하였고, 이때 응력비  $R$  및 하중 주파수는 각각 0.1, 10Hz로 하였다. 피로 시험 중 염료투입법을 실시하였고, 실험 종료 후 파면분석을 통하여 염료투입 시점에서의 복수 표면균열의 크기와 위치를 계측하였다. 얻어진 피로시험 결과를 Table 3에 정리하였다. 염료투입 시점  $N_D$ 는 시험편 파단수명  $N_T$ 에 대하여 20~70%에 해당하며, 이때 관측된 균열수는 1~6개로 시험편 간에 차이가 심하였다. 균열길이  $a$  및 균열길이  $2c$ 는 각각 0.14~5.45mm 및 0.51~10.03mm로 계측되었다.

Fig. 11은 7개의 시험 중 대표적으로 Specimen #1과 #5에 대한 관측된 복수 표면균열 모습 및 식(8)을 적용하여 피로균열진전을 모사한 예이다. 여기서, 관측된 표면균열의 수는 Specimen #1의 경우 2개이며, Specimen #5의 경우 6개로서 각각의 계측된 표면균열의 크기 및 위치 자료로부터



(a) Specimen #1



(b) Specimen #5

Fig. 11 Fractography and simulation of crack propagation

염료투입 시점부터 최종파단까지의 반복수 ( $N_T - N_D$ )를 추정할 수 있었다. Fig. 12는 모든 시험편에 대하여 추정된 피로수명 ( $N_T - N_D$ )를 Table 3의 실험결과와 비교한 결과이다. 추정된 피로수명이 실험치를 Factor 2 편차이내의 안전측 결과를 보여주고 있어, 본 연구에서 구축한 방법

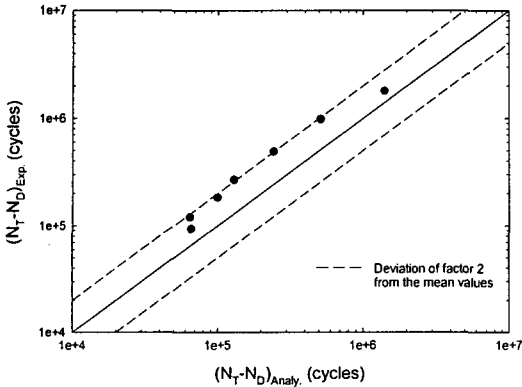


Fig. 12 Comparison of crack propagation life for cruciform welded joint

이 용접이음부의 실험결과를 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장 기구와 *Mk*-factor를 고려하여 십자형 필렛용접 이음부의 피로균열진전수명 평가법을 개발하였으며, 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 복수 표면균열의 간섭, 합체 및 성장이론은 Yuuki-Yoshida의 수정식 및 표면점 간 연결방법을 적용하였으며, 실험을 통하여 간섭계수  $r_m$ 은 0.2로 얻어졌다.

(2) 십자형 필렛용접 이음부의 부가구조 및 용접비드 형상을 고려한 파라미터 연구를 통해 *Mk*-factor 계산식을 도출하였다.

(3) *Mk*-factor는 균열깊이비  $a/t$ 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*-factor가 큰 변화를 보이나,  $a/c$ 가 0.6이상에서는 이 변화가 사라짐을 알 수 있었다.

(4) 실험적으로 얻어진 십자형 필렛용접 이음부 비드 선단에 발생한 복수 표면균열의 크기 및 분포로부터 피로수명을 예측하였으며, 이 결과는 실험치를 Factor 2 편차 이내로 모사하였다.

#### 후 기

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

#### 참고문헌

- (1) Lee, J., Chio, Y. and Kim, Y., 1993, "Fatigue Growth Life Prediction for Collinear Multiple Surface Cracks," *Transactions of KSME*, Vol. 17, No. 5, pp. 1668~1677.
- (2) 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.
- (3) 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.
- (4) 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.
- (5) 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.
- (6) Madox, S., 1975, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints," *International Journal of Fracture*, Vol. 11, No. 2, pp. 221~243.
- (7) 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.
- (8) Newman, J. and Raju, I., 1981, "An Empirical Stress Intensity Factor Equation for the Surface Crack," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185~192.
- (9) Fett, T., 1987, "An Extension of the Newman-Raju Formula," *International Journal of Fracture*, Vol. 33, pp. R47~R50.
- (10) Murakami, Y. and Nisitani, H., 1981, "Stress Intensity Factor for Interacting Two Equal



- Semi-Elliptical Surface Cracks in Tension," *JSME Ser. A*, Vol. 50, pp. 295~303.
- (11) Nemat-Nasser, S., 1982, "Interacting Dissimilar Semi-Elliptical Surface Flaws under Tension and Bending," *Engng. Frac. Mech.*, Vol. 16, pp. 373~386.
- (12) Yuuki, R. and Yoshida, T., 1986, "Fatigue Life Prediction System for Structures," *Journal of High Pressure Institute*, Vol. 24, No. 3, pp. 115~123.
- (13) ASME, 1989, "Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. XI : Rules for In-service Inspection of Nuclear Power Plant Components"
- (14) British Standard Institute, 1980, "Guidance on Some Methods for the Deviations of Acceptance Levels for Defects in Fusion Welded Joints" PD 6493.
- (15) BS 7910:1999, "Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures," *British Standard*.
- (16) Han, J., Han, S., Shin, B. and Kim, J., 2003, "Fatigue Life Evaluation Based on Welding Residual Stress Relaxation and Notch Strain Approach for Cruciform Welded Joint," *Proceedings of the KSME 2003 Fall Annual Meeting*, pp. 1103~1108.