

Mk-계수를 고려한 용접부 피로균열진전수명 평가

Estimation of Fatigue Crack Propagation Life for Weldments by using *Mk*-factor

한 승 호*, 한 정 우*, 임 전**

* 한국기계연구원 구조연구부

** 충남대학교 대학원 기계설계공학과

ABSTRACT Failure mechanisms of weldments under fatigue loads are interpreted that multiple collinear surface cracks initiating along weld toe propagate under the mutual interaction and coalescence of adjacent two cracks. To estimate fatigue crack propagation life for these weldments, the stress intensity factors of the multiple surface cracks have to be calculated which are influenced strongly by the geometrical complexity of weld toes and attachments. The *Mk*-factors derived by a parametric study can be introduced for the effective calculation of the stress intensity factors taking into account the geometrical complexity. The fatigue life was estimated by using the *Mk*-factors and the method considering the propagation mechanisms of the multiple surface cracks. The estimated values showed a good agreement with the measured fatigue life experimentally.

1. 서 론

지금까지 복수 표면균열의 연구는 주로 단면형상이 일정한 평활체에 대한 것으로 국한되어 있어 실제 용접구조와 같이 복잡한 형상을 갖는 경우, 이의 실용적인 적용에 어려움이 따랐다. 용접구조물의 복수 표면균열 진전수명을 평가하기 위하여 균열의 간섭, 합체 및 성장 기구를 고려하는 것은 물론, 균열발생 부위에 응력집중을 야기시키는 부가구조 및 용접비드에 의한 표면균열 선단의 국부적인 응력확대계수 상승분 *Mk*-factor^{1,2)}를 고려해야 한다.

본 연구에서는 용접 구조상세 중 대표적인 십자형 필렛, 커버 플레이트 및 종방향 거셋 용접 이음부를 선정하여, 유한요소해석법으로 *Mk*-factor 계산식을 도출하였다. 또한 십자형 필렛 용접 이음부에 대하여 실제 용접비드 선단에 발생하는 복수 표면균열의 크기 및 위치 분포를 고려한 피로균열진전 수명을 평가하였다.

2. *Mk*-factor 계산식

용접구조물은 부가구조 및 용접비드에 의하여 응력집중이 크게 발생하며, 비드 선단에 발생한 균열에도 영향을 주어 국부적으로 응력확대계수

K_I 를 변화시킨다. 이 경우 응력집중계수와 마찬가지로 *Mk*-factor를 도입할 수 있으며, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$Mk\text{-factor} = \frac{K_{I, \text{Plate with Attachment}}}{K_{I, \text{Same Plate without Attachment}}} \quad (1)$$

BS 7910¹⁾은 맞대기, 십자형 및 T형 필렛용접 이음부에 대하여 2차원 관통균열에 대한 *Mk*-factor 계산식을 제시하고 있으나, 3차원 균열에 대한 계산식은 단지 T형 필렛용접 이음부에 대한 Lee의 결과²⁾만을 인용하고 있다. 용접구조물의 이음부 형상은 매우 다양하며, 또한 복수 표면균열 진전수명 평가시 균열간의 간섭이나, 합체가 주로 표면방향의 균열 끝단에서 일어나는 것을 감안하면, 다양한 용접이음부 형상 및 균열의 최심점 뿐만 아니라 끝단에서의 응력확대계수를 모두 평가할 수 있는 3차원 모델링에 의한 *Mk*-factor 계산식이 필요하다.

Fig. 1은 본 연구에서 적용한 대표적인 세가지 용접이음부이다. 용접비드 선단의 기하학적 형상은 대표적으로 노치반경 ρ 및 플랭크 각 θ 로 표현할 수 있으며, 비파괴 측정법을 적용하여 이를 계측하였다.

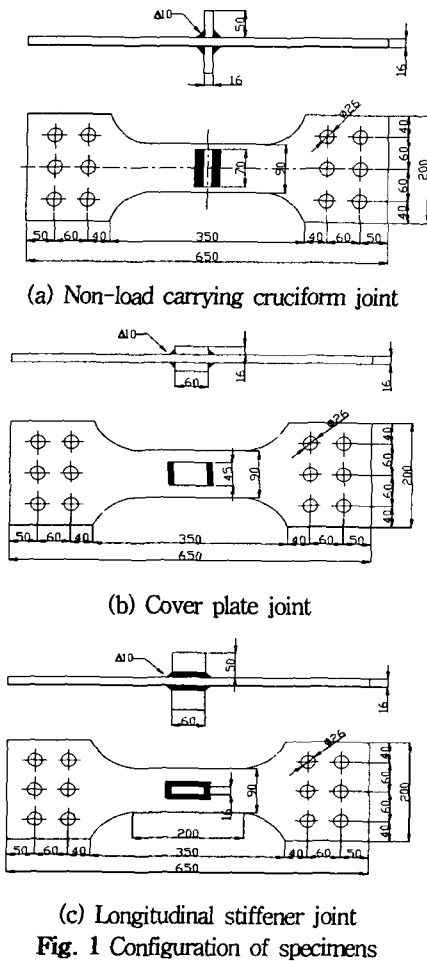
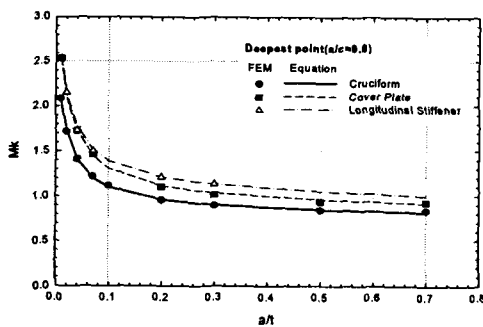
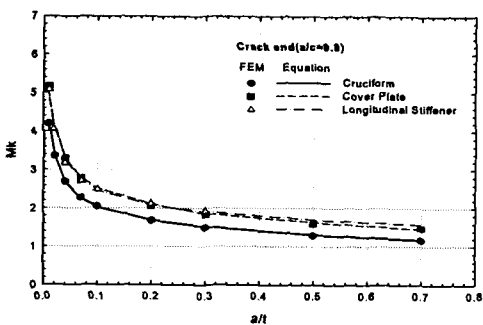


Fig. 1 Configuration of specimens



(a) At deepest point



(b) At crack end

Fig. 2 Comparison of Mk -factors of welded joints

Mk -factor의 파라미터 연구를 위한 반복계산은 상용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS를 이용하여 이루어졌다. 균열선단을 따라 특이요소를 생성시킨 3차원 solid 요소를 이용하였다. 3차원 표면균열의 Mk -factor는 균열 끝단과 최심점에서 얻어진다. 반복계산의 범위는 판두께 t 에 대한 균열깊이비 a/t 및 균열형상비 a/c 에 대하여 각각 0.01~0.7, 0.2~1.4이다. 이때 θ 는 각 용접이음부에 대하여 예측된 누적확률이 50%인 36.9, 39.7 및 38.7°로 하였고, ρ 의 Mk -factor에 대한 영향은 무시할 정도로 적으므로 $\rho=0$ 로 하였다.

파라미터 연구 결과 a/t 가 작아 질수록 부가구조 및 용접비드에 의한 영향이 크게 나타나 Mk -factor는 균열 끝단과 최심점 경우 모두 크게 증가한다. a/c 에 대한 Mk -factor 영향은 최심점의 경우 거의 찾아보기 힘들다, 균열 끝단에서는 a/c 가 0.2~0.4 사이에서 영향이 크게 나타나고, 0.6 이상에서는 이 변화가 사라진다. Fig. 2는 $a/c=0.8$ 에 대한 균열 최심점 및 끝단에서의 Mk -factor를 각 시험편 별로 비교한 것이다.

a/c 와 a/t 에 대한 Mk -factor 계산식은 유한요소해석 결과를 피팅(fitting)하여 구할 수 있다. 이 때 적용된 함수식은 식(2)와 같으며, 피팅계수 $A \sim G$ 는 Table 1과 같다.

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

3. 복수 표면균열의 피로균열진전 평가

3차원 복수 표면균열 끝단에서의 간섭조건을 고려한 응력확대계수 $(K_I)_{3D}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서, σ_t = 축하중 응력성분, a = 균열깊이,

r_m = 2차원 균열의 3차원 효과에 대한 보정 계수(실험상수)³⁾,

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

: 2차원 복수 관통균열에 대한 간섭계수

F_{Fett} = 형상보정계수⁴⁾

Table 1 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
A	4.1604	2.0513	4.9882	2.5226	4.9652	2.4705
B	2.3039	0.0917	2.6852	0.1405	3.1692	0.1899
C	5.1875	1.3577	5.0231	1.7642	6.0617	0.4521
D	1.4521	2.8483	1.4295	1.3335	1.3840	1.3757
E	27.3836	49.0783	28.8520	18.5551	21.8889	25.7221
F	72.3167	60.0267	71.1845	51.9361	60.1812	62.9703
G	45.1885	4.8892	49.0985	5.2475	20.2539	10.9013

4. 결 론

균열선단 표면점 간 연결을 복수 표면균열의 합체조건으로 하였으며, 균열깊이 *a*는 두 균열 중 더 큰 것으로 선택하고 균열길이 *2c*는 합체된 두 균열길이의 합으로 하였다.

용접부 복수 표면균열 피로해석을 위한 전산 프로그램은 *Mk*-factor의 계산, 인접균열간의 간섭효과, 합체조건 및 합체 후 균열의 재정의 과정으로 구성하였다. 이때, 균열깊이 및 길이에 대한 균열진전해석을 위하여 다음과 같은 Paris식이 이용되었다.

$$da/dN = 5.85 \times 10^{-13} \Delta K^{3.82} \quad (4)$$

$$dc/dN = 9.55 \times 10^{-13} \Delta K^{3.59} \quad (5)$$

Fig. 4는 십자형 필렛용접 이음부에 대하여 추정된 균열진전 피로수명을 실험결과와 비교한 결과이다. 추정된 피로수명이 실험치를 Factor 2 편차 이내의 안전측 결과를 보여주고 있어, 본 연구에서 구축한 방법이 용접이음부의 실험결과를 잘 모사하고 있음을 확인할 수 있다.

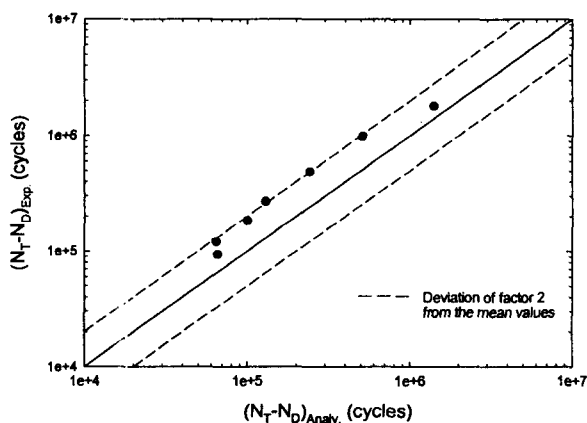


Fig. 4 Comparison of crack propagation life for cruciform joint

1) *Mk*-factor는 *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 사라진다.

2) 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. BS 7910 : Guide on Methods for Assessing the Acceptability of Flaws in Metallic Structures, British Standard (1999)
2. 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
3. R. Yuuki and T. Yoshida : Fatigue Life Prediction System for Structures, Journal of High Pressure Institute, 24-3 (1986), 115-123 (in Japanese)
4. T. Fett : An Extension of the Newman-Raju Formula, International Journal of Fracture, 33 (1987), R47-R50