

## 3차원 피로균열 진전해석을 통한 면외거셋 용접이음의 피로수명 평가

정영수<sup>1</sup>, 카이누마 시게노부<sup>2</sup>, 안진희<sup>3</sup>, 이원홍<sup>4\*</sup>

# Assessment of Fatigue Life of Out-Of-Plane Gusset Welded Joints using 3D Crack Propagation Analysis

Young-Soo Jeong<sup>1</sup>, Shigenobu Kainuma<sup>2</sup>, Jin-Hee Ahn<sup>3</sup>, Wong-Hong Lee<sup>4\*</sup>

**Abstract:** The estimation of the fatigue design life for large welded structures is usually performed using the liner cumulative damage method such as Palmgren-Miner rule or the equivalent damage method. When a fatigue crack is detected in a welded steel structure, the residual service life has to be estimated base on S-N curve method and liner elastic fracture mechanics. In this study, to examine the 3D fatigue crack behavior and estimate the fatigue life of out-of-plane gusset fillet welded joint, the fatigue tests were carried out on the model specimens. Investigations of three-dimensional fatigue crack propagation on gusset welded joint was used the finite element analysis of FEMAP with NX NASTRAN and FRANC3D. Fatigue crack growth analysis was carried out to demonstrate the effects of aspect ratio, initial crack length and stress ratio on out-of-plane gusset welded joints. In addition, the crack behaviors of fatigue tests were compared with those of the 3D crack propagation analysis in terms of changes in crack length and aspect ratio. From this analysis result, SIFs behaviors and crack propagation rate of gusset welded joint were shown to be similar fatigue test results and the fatigue life can also be predicted.

**Keywords:** Fatigue, Fatigue crack propagation analysis, Stress intensity factor, Out-of-plane gusset welded joint

## 1. 서 론

강교량의 공용수명에 영향을 미치는 대표적인 열화현상으로는 피로와 부식이 있으며, 구조부재의 기하학적 형상이 변화하는 부분의 응력집중에 의해 피로손상이 발생하고 있다(Miki and Sakano, 1990). 또한 강교량을 안전하게 유지관리하기 위해서는 용접이음부에서 발생된 피로균열의 진전가능성 및 잔존피로수명을 예측하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 용접 이음부의 피로 수명은 초기 균열이 발생할 때까지의 균열 발생 수명과 구조물의 붕괴까지 균열이 성장하는 균열 진전 수명으로 구분할 수 있으며, 대형 용접 구조물의 경우에는 균열 진전 수명이 전체 피로 수명의 대부분을 차지하는 것으로 알려져 있다(Yamada et al., 1979). 피로 수명 평가를 위한 S-N 방법과 균열 진전 수명 평가를 위한 선형파괴역학

(Linear Elastic Fracture Mechanics) 방법 등이 있다. 선형파괴역학 방법에 따라 초기균열을 가지는 용접이음의 파괴특성은 일반적으로 응력확대계수에 의하여 규정되어 지고 있다. 이러한 용접 이음부 피로 균열의 발생과 관련하여, 잔존 수명 추정에 관한 연구는 많은 연구자들에 의하여 활발히 이루어져 왔다(Jeon et al., 2001; Lee and Lee, 2009; Mikkola et al., 2015; Kim et al., 2017; Song et al., 2017). 하지만 강구조물 용접 이음부의 응력상태가 매우 복잡한 경우가 많으며, 각 조건에 대한 보정계수를 조합만으로 응력확대계수의 산정이 어렵다. 최근 유한요소를 이용하여 기계부품과 용접이음부에 대한 3차원 피로균열 진전거동 평가가 실시되어지고 있다.

Carter(2012)는 결정 소성 재료 모델을 이용한 프레팅 피로 균열(Fretting crack nucleation)과 피로균열을 기하학적 불연속으로 가정한 이산균열 접근법(Discrete crack method)을 이용하여 3차원 유한요소 해석을 실시하였다. Pourasei(2009)와 Rozumek(2010)는 기계부품 요소에 대한 피로시험과 3차원 유한요소 해석을 통하여 피로균열 진전속도를 평가하였으며, Holmstrand(2014)는 용접이음부의 형상 개선을 통한 피로시험 결과와 3차원 피로균열 진전해석 결과와 비교하여 유사함을 증명하였다.

본 연구에서는 피로균열이 발생된 강구조물 용접이음부의

<sup>1</sup>정회원, 부산대학교, 지진방재연구센터, 연구교수

<sup>2</sup>정회원, 큐슈대학교, 토목공학과, 부교수

<sup>3</sup>정회원, 경남과학기술대학교, 토목공학과, 조교수

<sup>4</sup>정회원, 경남과학기술대학교, 토목공학과, 교수, 교신저자

\*Corresponding author: whyee@gntech.ac.kr

Gyeongnam National University of Science and Technology, 33 Dongin-ro, Jinju, Gyeongnam 52725, Republic of Korea

•본 논문에 대한 토의를 2018년 2월 1일까지 학회로 보내주시면 2018년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

잔존피로수명 평가를 위한 3차원 피로균열 진전해석에 대한 기초적인 연구로서 면외거셋 용접이음의 피로시험 결과와 3차원 피로균열 진전해석에 의해 추정된 피로수명을 비교 분석하였다. NX NASTRAN 및 FRANC3D를 이용하여 3차원 피로 균열 진전 해석을 실시하였다. 면외거셋 용접이음의 응력확대계수는 균열 형상비 및 초기 균열 크기, 응력비를 고려하였으며 계산된 응력확대계수를 이용하여 피로수명을 평가하였다. 또한 균열 크기와 균열 형상비의 변화에 따른 면외거셋 용접이음의 균열 거동을 3차원 균열 진전 해석을 통하여 비교 분석 하였다.

## 2. 시험체 제작 및 피로시험

본 연구에서 대상으로 하는 면외거셋 용접이음 시험편의 제작에는 용접구조용 강재인 SM400A(JIS G3106)를 사용하였다. 시험체의 형상 및 치수는 Fig. 1에 나타내었으며, 플럭스스코어 타입의 와이어를 이용하여 CO<sub>2</sub> 반자동 용접을 실시하였다. Fig. 1(a)와 같이 용접의 시 종점부는 거셋 양 끝에 오도록 제작하였다. 기계적 성분 및 용접조건을 각각 Table 1과

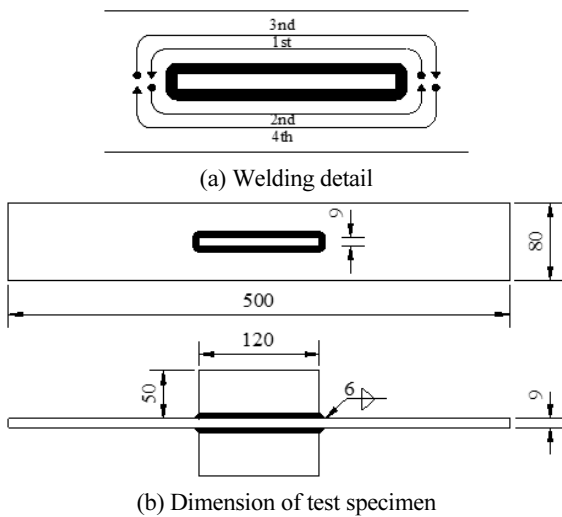


Fig. 1 Dimension and welding detail of test specimen

Table 1 Mechanical property of test specimen

Yield stress(MPa)	Tensile strength(MPa)	Elongation(%)
282	422	31

Table 2 Welding conditions of test specimen

Electric current(A)	Electric voltage(V)	Welding rate(cm/min)
220	26	24

Table 2에 나타내었다. 3차원 피로균열 진전해석과 피로시험 결과의 오차를 최소화하기 위하여, 피로 균열이 발생하는 용접 시작 중단부에서의 지단 반경(radius)과 지단 각도(flank angle)를 측정하였다. 모든 시험체의 용접 지단부의 3차원 형상을 측정 하였으며, 3차원 형상 측정은 용접 지단부의 형상을 고려하여 길이 방향으로 0.04 mm, 폭 방향으로 0.2 mm 간격으로 측정하였다. 각 시험체의 용접비드 크기는 평균 5.4~5.9 mm로 측정되었으며, 용접지단부의 형상 측정 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

피로 시험에는 ±200 kN 전기 유압식 재료 시험 장치를 이용하여, 응력비 0.1의 하중 조건에서 실시하였다. 응력 범위는 180, 135, 100, 80 및 60 MPa로 하였으며, 반복하중은 정현파의 일정한폭하중을 이용하였으며, 반복 속도는 약 10 Hz 실시하였다. 피로 균열의 발생 위치와 진전 거동을 평가하기 위하여 비치 마크 시험을 도입하였다.

피로 시험 결과에서 얻어진 S-N 곡선을 Fig. 3에 나타내었으며, 일본 강구조 협회(JSSC, 2012)의 피로 설계 지침의 피로 설계등급과 비교하였다. 본 연구에서의 면외거셋 용접 이음(용접 지단부: 비마무리, 거셋 길이 : 100 mm 이상)에 대한 강

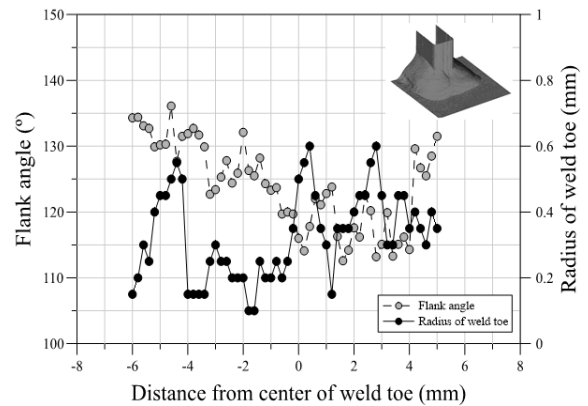


Fig. 2 Weld toe profile of test specimen

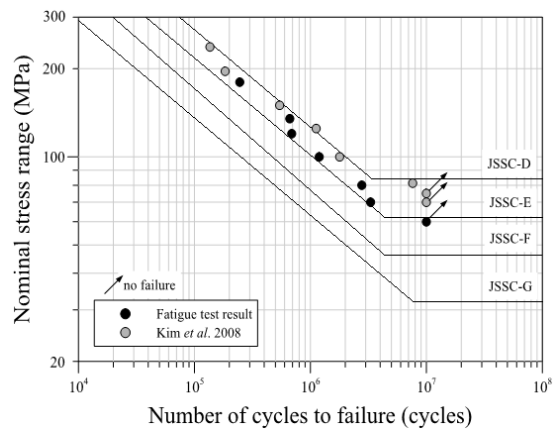


Fig. 3 S-N curve

도 등급 G에 해당하지만, 1 등급 높은 F등급을 만족하였으며, 기존의 연구결과와 피로수명과 유사하게 나타났다(Kim et al., 2013).

### 3. 피로균열 진전해석

피로균열 진전에 대한 파괴역학 접근법의 기본 개념과 실제 적용은 Paris Law(1960)과 Newman-raju(1984)식이 가장 광범위하게 활용되고 있으며, 피로균열 진전속도는 오직 응력확대계수에 의존하게 된다. 많은 연구자들이 균열진전속도와 응력확대계수와와의 관계를 규명하였지만 Paris의 식이 균열진전평가에 가장 기본이 된다. 용접이음부에서는 일반적으로 언더컷, 용입부족 등의 결함을 포함하고 있으므로, 본 연구에서는 용접이음부의 피로수명은 균열진전 수명으로 가정하여 선형파괴역학 접근법과 유한요소 해석을 통하여 면외거셋 용접이음의 피로수명을 평가하였다.

#### 3.1 유한요소 해석모델

유한요소 해석은 NX NASTRAN 및 FRANC3D를 사용하였으며, Fig. 4에 피로균열 진전해석의 흐름도를 나타내었다. 균열진전 해석에는 초기 균열을 포함하는 국부 모델을 도입하여 사용하였다. NX NASTRAN은 전체 모델의 변위를 계산하였으며, FRANC3D는 NX NASTRAN에서 계산된 변위를 기반으로 새로운 균열 저면의 계산 및 균열 진전을 고려한 국

부 모델의 re-mesh를 반복적으로 수행하여 균열 저면의 응력 확대계수를 산출하였다.

유한요소모델은 시험체의 용접지단부의 측정결과를 사용하여 모델화 되었으며, 피로시험편과 동일한 조건에서 유한요소 해석을 실시하였다.

피로균열 진전해석에서 초기균열 크기 및 형상은 중요한 매개변수이며 BS7608에서는 형상비  $a/b=1/5$ 의 반타원형 초기형상을 사용할 것을 권장하고 있다. 피로수명 추정법은 수명 증가법과 균열 증분법으로 구분할수 있으며, 본 연구에서는 균열 증분법을 이용하여 피로균열 진전해석을 실시하였다. 이러한 평가에서 중요한 인자는 균열 증분량이며, Fig. 5와 같이 균열크기 1 mm까지의 균열 증분량은 0.1 mm, 3 mm까지 0.2 mm, 최종 파괴까지 0.4 mm로 하였다. Fig. 6에 면외 거셋 용접이음의 피로균열 진전해석 결과를 나타내었다. 또한 시험체의 용접지단부 형상과 유한요소 해석 모델과의 오차를 최소화하기 위하여 시험체의 용접지단부 형상 측정결과를 이용하여 모델화 하였다.

#### 3.2 피로균열 진전수명 계산

피로균열 진전수명은 Paris Law를 개선하여 Klesnil and Lukas(1972)에 의해 제안된 식 (1), (2)와 같이 계산할 수 있으며, C와 n은 강구조물 피로 설계(JSSC)에서 제안된 값을 사용하였다.

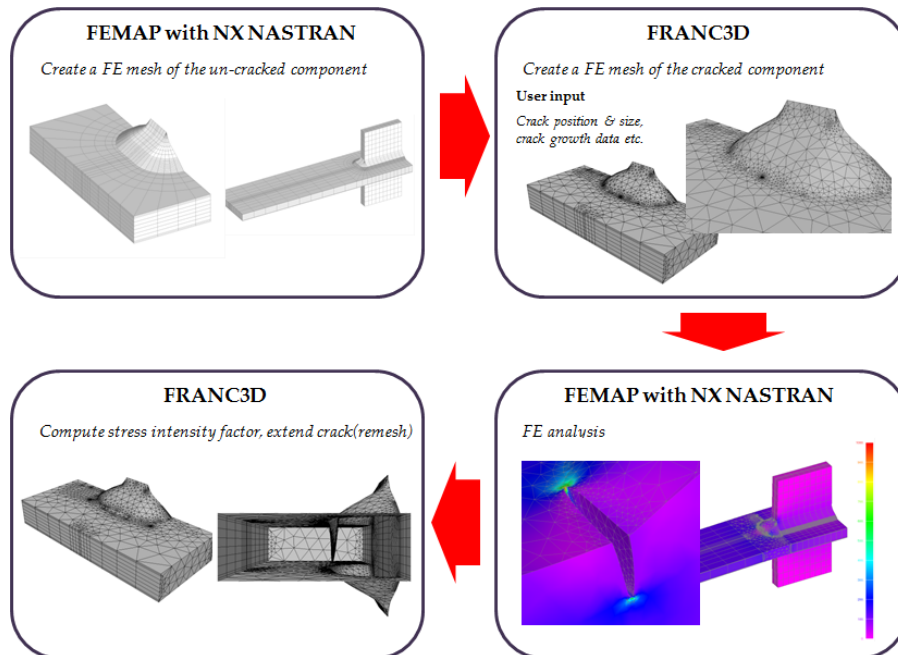


Fig. 4 Crack propagation analysis flow diagram

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K - \Delta K_{th})^n \quad (1)$$

$$N = \int_{a_i}^{a_c} \frac{da}{C(\Delta K^n - \Delta K_{th}^n)} \quad (2)$$

여기서,  $da/dN$ : mm/cycle,  $\Delta K, \Delta K_{th}$  :  $MPa\sqrt{m}$ ,  $C=1.5 \times 10^{-11}$ ,  $n=2.75$ ,  $\Delta K_{th} = 2.4$

단순인장하중 상태에서 응력확대계수 I 모드와 유효응력확대계수는 유사한 값을 나타낸다. 하지만 균열 형상비 및 응력비의 영향에 따라 응력확대계수 I 모드와 유효응력확대계수는 다르게 나타나며, 본 연구에서의 피로수명추정은 식 (3) 과 같이 변형에너지 해방율(Strain energy release rate)을 고려한 유효응력확대계수를 이용하여 비교 분석하였다.

$$K_{eff} = \sqrt{K_I^2 + K_{II}^2 + \frac{1}{1-\nu^2} K_{III}^2} \quad (3)$$

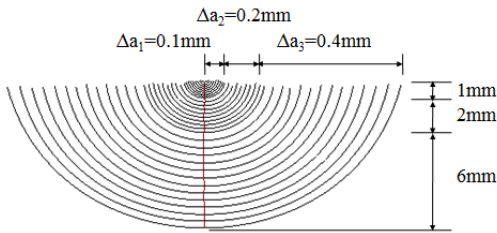


Fig. 5 History of Crack propagation analysis

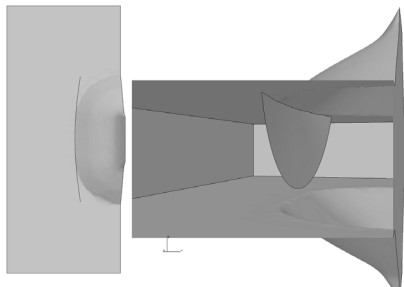


Fig. 6 Result of crack propagation analysis

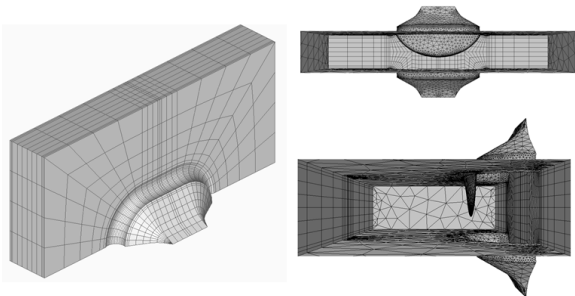
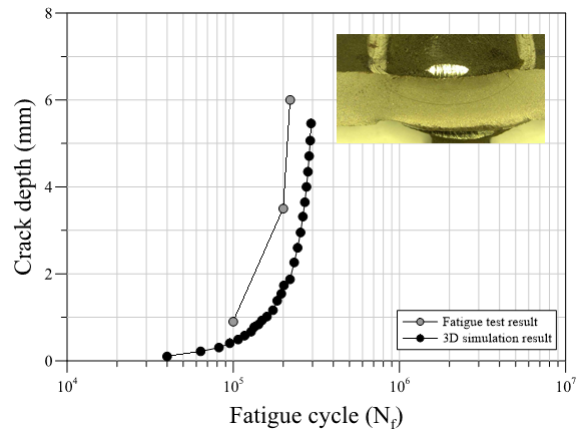


Fig. 7 Result of crack propagation analysis

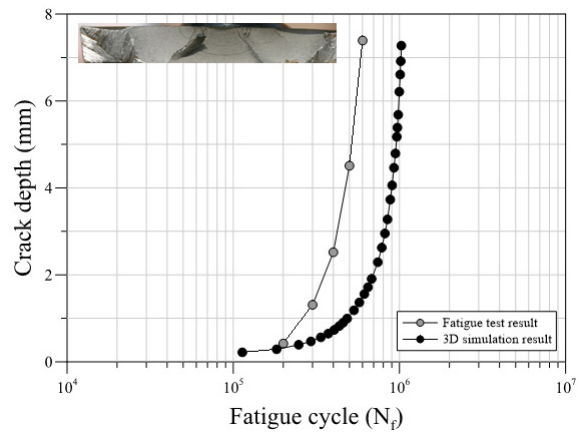
여기서,  $K_{eff}$ 는 유효응력확대계수,  $\nu$ 는 포아송비  
 시험체에 단수의 피로균열 발생을 유도하여 유한요소 해석 결과의 재현성을 평가하기 위하여 Fig. 7과 같이 용접지단부의 피로강도 향상을 위한 형상 개선과 유사한 방법으로 직경 2 mm 인 인위적인 가공을 실시하였다. 시험체 지단부의 응력집중 발생 위치와 형상을 동일하게 하여 피로시험과 피로균열 진전해석을 실시하였다. Fig. 8(a)에 응력범위 180 MPa, 응력비 (R=0.1), 초기균열 크기 0.1 mm, 균열형상비 1/2에 대한 피로 시험 결과와 균열진전 수명과 비교하였다. FRANC3D를 이용한 피로균열 진전해석 통하여 계산된 피로수명은 피로실험 결과와 유사하게 나타났으며, 유한요소 해석의 신뢰성을 확보하였다.

### 3.3 피로균열 진전거동 평가

용접 그대로의 시험체에 대한 피로균열 진전거동과 피로균열 진전해석 결과를 Fig. 8(b)에 나타내었다. 응력범위 120 MPa, 응력비(R=0.1), 초기균열 크기 0.1 mm, 균열형상비 1/2 인 경우의 균열진전 해석결과와 피로 실험결과를 비교하였



(a) Treatment groove specimen at the weld toe



(b) As-welded specimen

Fig. 8 Treatment groove at the weld toe

다. 저응력범위에서의 피로수명은 용접지단부의 형상에 영향을 많이 받으며, 본 연구에서의 유한요소 해석모델의 용접 지단부 형상은 시험체의 형상 측정결과의 평균값을 사용하여 오차가 발생한 것으로 판단된다. 하지만 Fig. 9와 같이 균열진전속도와 응력확대계수와의 관계에서는 피로시험 결과와 진전해석 결과는 유사하게 나타났다.

## 4. 피로균열 진전해석결과

### 4.1 초기 균열 크기 영향

균열진전해석을 통한 피로수명 추정은 초기균열 크기에 대한 영향이 크게 발생하며, 초기균열 크기를 변수로 면외거셋 용접이음의 피로수명을 추정하였다. 초기 균열 크기가 응력확대계수 및 피로 수명에 미치는 영향은 균열 형상비 1/2 및

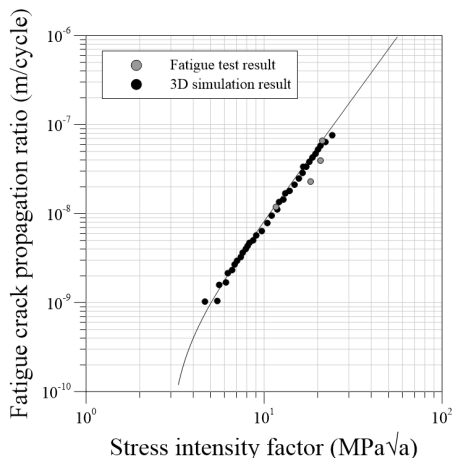
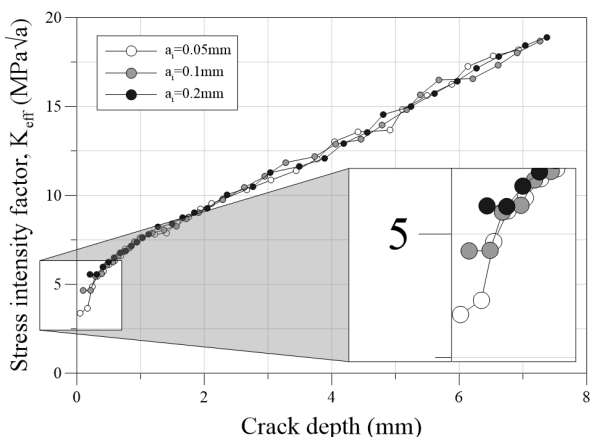


Fig. 9 Fatigue crack propagation ratio



(a) Comparison of SIF to initial crack size

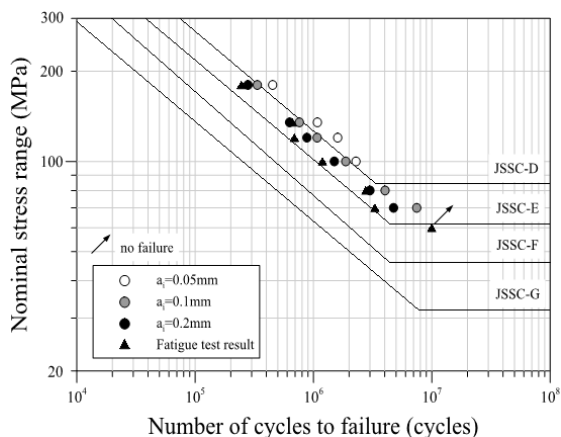
응력비 0.1에 대하여 초기 균열 크기를 변경하여 평가하였다. 균열 진전 과정에서의 초기 균열 크기가 다른 경우, Fig. 10(a)과 같이 각각 균열 길이가 비슷한 균열 형상이 되기 때문에 계산된 응력확대계수는 유사한 결과를 나타내었다. 하지만, 피로균열 발생단계에서의 균열 크기 0.1 mm의 유효응력확대계수는 균열 크기 0.2 mm의 유효응력확대계수보다 약 120%까지 급격하게 증가하는 것으로 나타났다. 피로수명 추정 결과를 Fig. 10(b)에 나타내었다. 균열 크기 0.2 mm의 경우가 피로 시험결과와 가장 유사한 결과를 나타내었다. 또한 초기균열이 0.05 mm인 경우의 저응력 범위, 100 MPa 이하의 응력범위에서 유효응력확대계수는 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th}$ ) 이하로 평가되어 피로균열이 진전하지 않았다.

### 4.2 초기 피로균열 형상비 영향

초기 균열 형상이 피로 수명에 미치는 영향은 판 두께 방향으로 초기 균열 크기를 고정하고 폭 방향의 균열 크기를 변화시킴으로써 균열 형상비의 영향을 평가하였다. 초기 균열 크기는 0.1 mm로 하였으며 균열 형상비는 1, 1/2, 1/3, 1/5로 하였다. Fig. 11(a)는 각각의 균열 형상비에 따라 균열진전과정에서의 균열형상 변화를 나타내었으며, Fig. 11(b)는 각각의 형상비에 따른 응력확대계수를 나타내었으며, 형상비 1을 제외하고 유사한 결과를 나타내었다.

### 4.3 응력비 영향

Paris Law는 피로균열진전에 미치는 응력비( $\sigma_{min}/\sigma_{max}=K_{min}/K_{max}$ )의 영향을 설명하지 못하는 문제점이 있다. Elber는 인장하중에서도 균열단합 현상에 대하여 설명하고 있으며, 균열단합은 피로균열을 지배하는 가장 중요한 인자로 인식되고 있다. 인장응력하에서 균열이 닫혀 있다면 균열진전에 영향을 주지

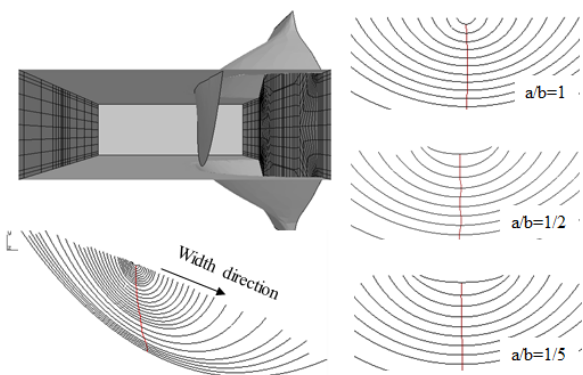


(b) Estimation of fatigue life

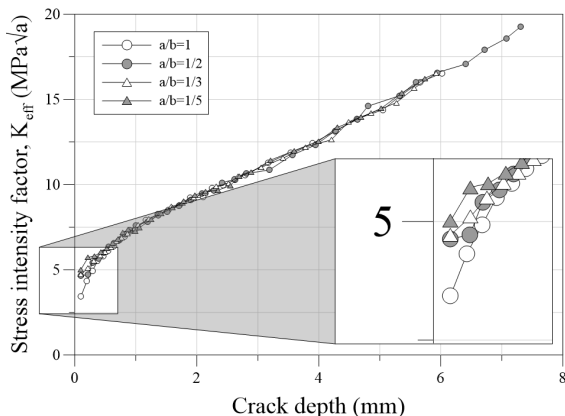
Fig. 10 SIF and fatigue life considering effect of initial crack length

않으므로, 균열이 완전히 열려 있는 동안의 응력만이 균열진전에 영향을 주게 된다.

대형용접 구조물의 피로수명 예측은 실제 구조물에 작용하는 대표적인 하중이력을 측정하여 이를 반복으로 작용시켰을 때의 수명을 계산하게 된다. 하지만 피로균열 진전에 미치는 균열단합의 중요성이 비교적 오랜 기간 인식되어 많은 연구에도 불구하고 실험 및 계측 등의 어려움 때문에 재료의 피로균열단합에 대한 데이터는 많지 않다. 본 연구에서는 응력비의 변화를 통하여 피로균열 단합거동에 따른 피로수명을 평가하여, 향후 대형용접 구조물에 작용하는 변동하중하의 피로균열 진전해석에 적용하고자 한다. Fig. 12(a)는 응력비 변화에 따른 유효응력확대계수를 나타내었다. 낮은 응력비에서 유효응력확대계수는 응력확대계수( $\Delta K$ )에 근접하게 되며 균열 단합 현상은 보다 적게 일어나며 Fig. 12(b)와 같이 피로균열 진전해석결과는 알려진 것과 같이 동일한 결과를 나타내었다. 하지만 높은 응력비에서 유효응력확대계수는 응력확대계수( $\Delta K$ ) 작게 나타나며 피로균열은 큰 응력범위를 가진 하중에 반응하게 되며, 동일한 피로균열 크기에서도 응력비가 증가함에 따라 유효응력확대계수는 감소하였다. 또한 Fig.



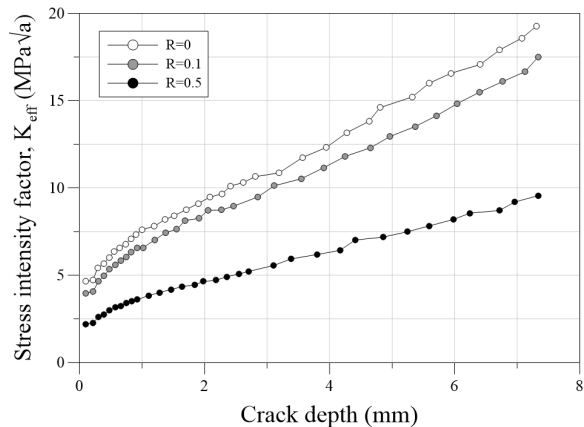
(a) Comparison of crack propagation shape



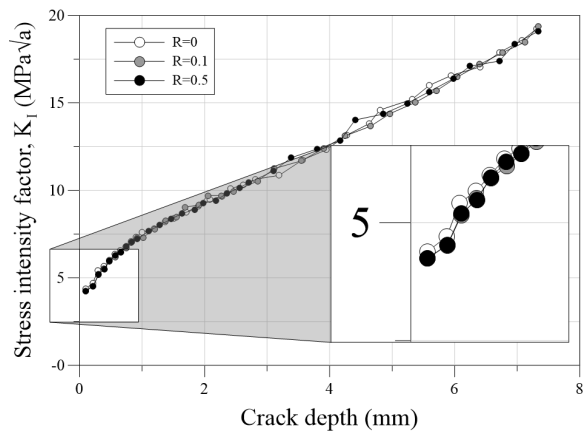
(b) Comparison of SIF to initial crack aspect ratio

**Fig. 11** Crack propagation shape and SIF considering effect of initial crack aspect ratio

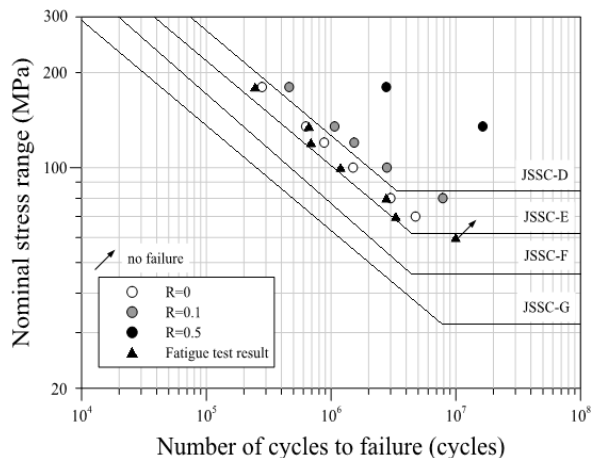
12(c)에 나타난 것과 같이 동일 응력상태에서는 균열단합으로 인하여 피로수명 증가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 대형용접 구조물 등의 변동하중하에서 하중간섭효과를 평가할 수 있을 것으로 판단된다.



(a) Comparison of effective stress intensity factor to stress ratio



(b) Comparison of stress intensity factor to stress ratio



(c) Estimation of fatigue life

**Fig. 12** Effective stress intensity and fatigue life considering effect of stress ratio

## 5. 결 론

면외거셋 용접이음의 피로시험 결과와 3차원 피로균열 진전해석에 의해 추정된 피로수명을 비교 분석하였다. 본 연구의 결과를 다음과 같이 정리하였다.

시험체의 용접지단부를 인위적인 가공을 실시한 경우 단수의 피로균열 발생을 유도하여 피로시험 결과와 피로균열 진전해석결과와 유사하게 나타났으며 FRANC3D를 이용한 피로수명이 가능성을 확인하였다. 또한 시험체의 용접지단부 형상 측정결과를 이용하여 피로수명 추정결과 오차가 발생하였지만, 균열진전속도와 응력확대계수와의 관계에서는 피로시험 결과와 진전해석 결과는 유사하게 나타났다. 그리고 최적의 피로균열 진전해석 조건을 도출하기 위하여 초기균열 크기, 균열 형상비, 응력비를 변수로 피로수명을 추정하였으며, 선형과피역학 접근법과 유한요소 해석을 통하여 면외거셋 용접이음의 피로수명이 평가 가능성을 확인하였다.

본 연구에서는 피로균열이 발생된 강구조물 용접이음부의 잔존피로수명 평가를 위한 3차원 피로균열 진전해석에 대한 기초적인 연구로서 면외거셋 용접이음의 피로시험 결과와 3차원 피로균열 진전해석에 의해 피로수명 예측 가능성을 확인하였다. 실제 강구조물에서는 구조형식에 따라 단순인장만 복 응력뿐만 아니라 다양한 하중상태 및 피로균열 발생 등에 의하여 응력방향과 크기 등이 변화하게 되며 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2017년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

## References

BS 7608 (2014), Guide to Fatigue Design and Assessment of Steel Structures, British Standard Institution.  
Carter, B. J., Schenck, E. C., Wawrzynek, P. A., Ingrassia, A. R., and Barlow, K. W. (2012), Three-Dimensional Simulation of Fretting Crack Nucleation and Growth, *Engineering Fracture Mechanics*, 96, 447-460.  
Elber, W. (1970), Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension, *Engineering Fracture Mechanics*, 2, 37-45.  
FRANC3D Version 6.0 : <http://www.cfg.cornell.edu/>.  
Holmstrand, T., Mrdjanov, N., Barsoum, Z., and Astrand, E. (2014),

Fatigue Life Assessment of Improved Joints Welded with Alternative Welding Techniques, *Engineering Failure Analysis*, 42, 10-21.  
Japanese Industrial Standard (JIS) G3106 (2008), Rolled Steel for Welded Structure.  
Japanese Society of Steel Construction (JSSC) (2012), Fatigue Design Recommendations for Steel Structures, Gihodo.  
Jeon, Y. C., Kim, Y. I., Kang, J. K., and Han, J. M. (2001), A Study on Fatigue Life Prediction of Welded Joints Through Fatigue Test and Crack Propagation Analysis, *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), 93-106.  
Kim, H. S., Park, T. J., Lee, D. J., Shin, S. B., and Kim, M. H. (2017), A Study on Fatigue Crack Growth Parameters for Fatigue Life Assessment based on Fracture Mechanics, *Journal of Welding and Joining*, 35(1), 61-67.  
Kim, I. T. (2013), Fatigue Strength Improvement of Longitudinal Fillet Welded Out-of-Plane Gusset Joints using Air Blast Cleaning Treatment, *International Journal of Fatigue*, 48, 289-299.  
Klensil, M., and Lukas, P. (1972), Influence of Strength and Stress History on Growth and Stabilisation of Fatigue Cracks, *Engineering Fracture Mechanics*, 4, 77-92.  
Lee, C. S., and Lee, J. M. (2009), Numerical Analysis Model for Fatigue Life Prediction of Welded Structures, *Journal of Welding and Joining*, 12, 49-54.  
Miki, C., and Sakano, M. (1990), A Survey of Fatigue Cracking Experience in Steel Bridges, IIW, XII-1383-90.  
Mikkola, E., Murakami, Y., and Marquis, G. (2015), Equivalent Crack Approach for Fatigue Life Assessment of Welded Joints, *Engineering Fracture Mechanics*, 149, 144-155.  
Newman, J. C., and Raju, I. S. (1984), Stress-Intensity Factor Equations for Cracks in Three-Dimensional Finite Bodies Subjected to Tension and Bending Loads, NASA Technical Memorandum 85793, NASA Langley Research Center, Hampton.  
Paris, P. C., and Erdogan, F. (1960), A Critical Analysis of Crack Propagation Laws, *Journal of Basic Engineering*, 85, 528-534.  
Poursaeidi, E., and Salavatian, M. (2009), Fatigue Crack Growth Simulation in a Generator Fan Blade, *Engineering Failure Analysis*, 16, 888-898.  
Rozumek, D., Lachowicz, C. T., and Macha, Ewald. (2010), Analytical and Numerical Evaluation of Stress Intensity Factor along Crack Paths in the Cruciform Specimens under Out-of-Phase Cyclic Loading, *Engineering Fracture Mechanics*, 77, 1808-1821.  
Song, W. K., Liu, X., Berto, F., Wang, P., Xu, J., and Fang, H. (2017), Strain Energy Density based Fatigue Cracking Assessment of Load-Carrying Cruciform Welded Joints, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 90, 142-153.  
Yamada, K., Makino, T., and Kikuchi, Y. (1979), Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Cracks Emanating from Toe of Fillet Weld, *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, 292, 1-12.

Received : 09/28/2017

Revised : 11/08/2017

Accepted : 11/15/2017

---

**요 지** : 대형 용접 구조물에 대한 피로설계 수명의 예측은 일반적으로 Palmgren Miner과 등가손상도 방법 또는 선형누적손상도 방법을 사용한다. 또한 용접 구조물에서 피로 균열이 발생되면 잔존 수명은 S-N 곡선과 선형 파괴역학에 기초하여 예측되고 있다. 본 연구에서는 면외거셋 용접이음의 3차원 피로균열 진전거동과 피로수명을 예측하기 위하여 피로 시험을 실시하였다. 면외거셋 용접이음의 3차원 피로균열진전 해석은 NX NASTRAN 및 FRANC3D를 이용하여 유한요소 해석을 실시하였다. 면외거셋 용접이음의 균열 형상비, 초기균열 크기 및 응력비에 미치는 영향을 검토하기 위하여 피로균열진전 해석을 실시하였다. 또한 초기균열크기, 균열 형상비와 응력비의 변화에 따른 3차원 피로균열진전 해석 결과와 피로시험결과를 비교하였다. 피로균열진전 해석결과, 피로균열 진전속도와 응력확대계수와와의 관계에서 피로시험과 유사하게 나타남을 확인하였으며, 면외거셋 용접이음의 피로수명을 추정할 수 있음을 확인하였다.

**핵심용어** : 피로, 피로균열 진전해석, 응력확대계수, 면외거셋 용접이음

---