



# 반타원 균열을 갖는 유한판의 하한계응력확대계수의 균열길이 의존성

## Crack Length Dependence of Threshold Stress Intensity Factor of Finite Plates with Semi-Elliptical Crack

현재용\* · 김민현\*\* · 남기우\*\*\*†

Jae-Yong Hyun\*, Min-Heon Kim\*\* and Ki-Woo Nam\*\*\*†

(Received 15 May 2019, Revision received 06 August 2019, Accepted 08 August 2019)

**Abstract:** In this study, the crack length dependence of the threshold stress intensity factor ( $\Delta K_{th}$ ) for semi-elliptical cracks in the finite plate subjected to bending stress was evaluated.  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) increased sharply at short crack depth and length. Mild steel (M steel) showed a tendency to gently increase at short crack depth and length, compared to ultra high strength steel. That is, different characteristics were shown depending on the material strength.  $\Delta K_{th}$  of UHS steel and M steel was constant regardless of the width and crack aspect ratio (As). Regardless of the steel grade and specimen size,  $\Delta K_{th}$  of As=0.3 for the crack depth was slightly larger than 1.0. On the other hand, that of As=1.0 for the crack length was much larger than 0.3.

**Key Words :** Ultra high strength steel, Mild steel, Threshold stress Intensity factor

### 1. 서 론

지난 수십 년 동안, 매우 짧은 균열을 검출하고 측정하기 위한 노력과 매우 작은 균열 크기에 대한 파괴 역학 방법 사용에 대한 큰 관심은 소위 "짧은 균열" 문제였다.<sup>1,2)</sup> 이러한 균열은 긴 균열의 피로 거동에 비교하여 비정상적인 피로 거동을 나타낸다. 즉 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 에 대하

여 긴 균열 곡선에 의하여 예측된 것보다 높은 균열 성장 속도  $da/dN$ ,  $\Delta K$ 가 증가함에 따라 종중  $da/dN$  감소, 긴 균열 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ ) 보다 낮은  $\Delta K$ 에서 균열 성장, 균열 성장률은 재료 미세 구조에 크게 의존함, 응력확대계수 범위의  $\Delta K_{th}$ 는 일반적으로 긴 균열에 의하여 결정된다. 그러므로 선형 탄성 파괴 역학(LEFM)에 의하면, 이와 같은 데이터는 균열 크기에 의존하지 않

\*\*\*† 남기우(교신저자)(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358x>) : 교수, 부경대학교 재료공학과, 마린융합디자인협동

E-mail : [namkw@pknu.ac.kr](mailto:namkw@pknu.ac.kr), Tel : 051-629-6358

\*현재용(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7154-0114>) : 대학원생, 부경대학교 기계공학학연협동

\*\*김민현(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-8255-6341>) : 대학원생, 부경대학교 마린융합디자인협동

\*\*\*† Ki-Woo Nam(ORCID:<http://orcid.org/0000-0001-7019-358x>) : Professor, Dept. Materials Science and Engineering, Interdisciplinary Program of Marine Convergence Design, Pukyong National University.

E-mail : [namkw@pknu.ac.kr](mailto:namkw@pknu.ac.kr), Tel : 051-629-6358

\*Jae-Yong Hyun(ORCID:<https://orcid.org/0000-0002-7154-0114>) : Graduate Student, UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Pukyong National University.

\*\*Min-Heon Kim(ORCID:<https://orcid.org/0000-0001-8255-6341>) : Graduate Student, Interdisciplinary Program of Marine Convergence Design, Pukyong National University.

는다.

Frost<sup>3)</sup>는 먼저 짧은 균열 영역에서 LEFM 기반의  $\Delta K_{th}$ 의 유효성에 의문을 제기하여, 균열 길이가 감소함에 따라  $\Delta K_{th}$ 가 감소함을 보여 주었다. Kitagawa와 Takahashi<sup>4)</sup>는 후에  $\Delta K_{th}$ 가 긴 균열보다 작은 천이 균열 길이가 존재한다는 것과 균열 길이가 재료 미세 구조에 의존한다는 것을 발견하였다. 균열 길이에 대한  $\Delta K_{th}$  의존성 (균열 크기효과)은 일반적으로 "Kitagawa diagram"으로 알려진 플롯으로  $\Delta K_{th}$ 로 설명한다. Kitagawa diagram을 해석하기 위하여 연구가 수행되었다.<sup>5-10)</sup>

본 연구는 피로파괴과정의 소성거동을 비선형 문제로 취급하여 유도한 식 (11)을 사용하여, 시험편 치수, 균열 중횡비(As) 및 응력비(R)에 따르는 임의의 균열에 대한 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )의 영향을 평가하였다.

## 2. 재료 및 평가방법

본 장에서 평가에 사용하는 재료는 초고장력강과 연강이다. 초고장력강의 평활재 피로한도  $\Delta\sigma_w^R$ 는 560 MPa ( $R=0$ )과 280 MPa ( $R=0.5$ )이고, 연강은 300 MPa ( $R=0$ )과 150 MPa ( $R=0.5$ )이다. 시험편의 치수는 판폭  $2W=50\text{ mm}$ , 두께  $t=10\text{ mm}$ 와 판폭  $2W=10\text{ mm}$ , 두께  $t=3\text{ mm}$ 로 두 종류이다. 긴 균열의 하한계응력확대계수 ( $\Delta K_{th(l)}$ )는  $6.0\text{ MPa}\sqrt{m}$  ( $R=0$ )와  $4.24\text{ MPa}\sqrt{m}$  ( $R=0.5$ )이다. Table 1은 본 연구에서 평가를 위하여 가정한 재료 조건이다.

Table 1 Material's conditions assumed for calculation

Materials	R	$\Delta\sigma_w$ MPa	$\Delta K_{th(l)}$ MPa $\sqrt{m}$
UHS steel	0	560	6.0
	0.5	280	3.0
M steel	0	300	6.0
	0.5	150	3.0

무한판 중에 길이  $2c_0$ 의 관통균열이 굽힘응력  $\sigma_B$ 을 받을 때의 응력확대계수  $K$ 는 식 (1)로 구할 수 있다.

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi c_0} \quad (1)$$

한편, 유한판 중의 반타원 표면균열의 응력확대계수  $K$ 는 Newman-Raju 식 (12)로 평가할 수 있다. 유한판 중에 길이  $2c$ , 깊이  $a$ 의 반타원 표면균열이

굽힘응력  $\sigma_B$ 를 받을 경우, 응력확대계수  $K$ 는 식 (2)로 구할 수 있다.

$$K = \frac{H\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right) F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{b}, \phi\right)}{\sqrt{Q\left(\frac{a}{c}\right)}} \sigma_B \sqrt{\pi a} \\ = \beta \sigma_B \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

여기서,  $H, F, Q$ 는 굽힘응력에 대한 형상보정 함수,  $t$ 는 판 두께,  $b$ 는 유한판 폭의 절반,  $\phi$ 는  $K$ 를 평가하는 반타원표면균열의 각도이다.  $\beta$ 는 형상보정함수를 정리한 것이다. 유한판 중의 반타원 표면균열이 굽힘응력을 받는 경우, 동일한 응력에서 같은  $K$ 를 나타내는 무한판 중의 관통균열길이를 등가균열길이  $c_e$ 로 하면, 식 (1)과 식 (2)는 식 (3)이 성립한다.

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi c_e} = \beta \sigma_B \sqrt{\pi a} \\ K = \sigma_B \sqrt{\pi c_e} = \beta \sigma_B \sqrt{\pi c} \quad (3)$$

식 (3)을 정리하면, 식 (4)의 관계가 얻어진다.

$$\text{등가균열깊이 } \sqrt{c_e} = \beta \sqrt{a} \\ \text{등가균열길이 } \sqrt{c_e} = \beta \sqrt{c} \quad (4)$$

응력비  $R$ 의 굽힘응력을 받는 유한판 중의 반타원 균열에 대한  $\Delta K_{th}^R$ 의 균열길이 의존성을 식 (5)로 구할 수 있다.<sup>11)</sup>

$$\Delta K_{th}^R = 2\Delta\sigma_w^R \sqrt{\frac{c_c}{\pi}} \cos^{-1} \left[ \left\{ \frac{\pi}{8c_c} \left( \frac{\Delta K_{th}^R(l)}{\Delta\sigma_w^R} \right)^2 + 1 \right\}^{-1} \right] \quad (5)$$

여기서  $\Delta\sigma_w$ 는 평활재의 피로한도이다.

식 (5)는 식 (4)의 등가균열 깊이 및 등가균열 길이를 대입하면, 반타원 균열의 표면 및 깊이에서의  $\Delta K_{th}^R$ 를 구할 수 있다.

응력비(R) 변화에 따른  $\Delta K_{th}^R(l)$ 은 ASME 규격 식 (6)으로 구하였다.

$$\Delta K_{th}^R(l) = \Delta K_{th}^o \sqrt{(1-R)} \quad (6)$$

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 1은 초고장력강(UHS steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 깊이(a)와의 관계이다. 이것은 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다.  $\Delta K_{th}$ 는 응력비에 관계없이 As=0.3이 약간 크게 나타났다. 즉, R=0에서 As=1.0은 0.01 mm에서 3.11 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 4.97 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 5.31 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 5.62 MPa  $\sqrt{m}$  이고, As=0.3은 0.01 mm에서 3.24 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 5.06 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 5.38 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 5.66 MPa

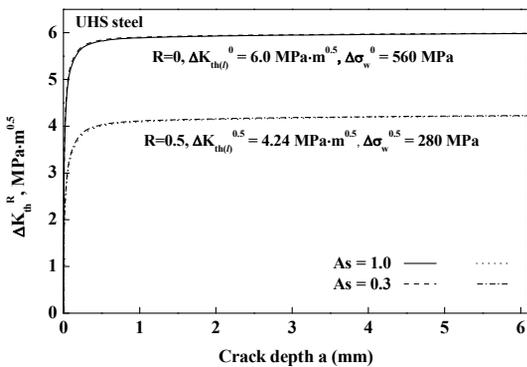


Fig. 1 Relationship of crack depth and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) in case of 2 W=50 mm, t=10 mm

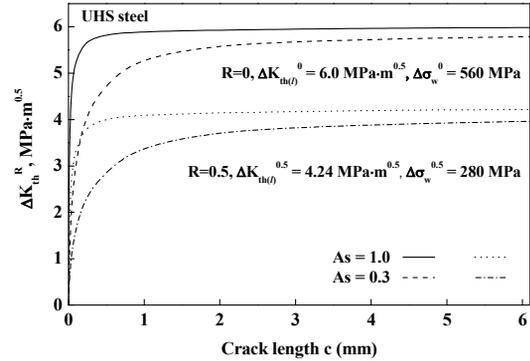


Fig. 2 Relationship of crack length and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) in case of 2 W=50 mm, t=10 mm

$\sqrt{m}$ 이었다. 한편 즉, R=0.5에서 As=1.0은 0.01 mm에서 1.67 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 3.07 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 3.41 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 3.76 MPa  $\sqrt{m}$  이고, As=0.3은 0.01 mm에서 1.76 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 3.15 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 3.48 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 3.80 MPa  $\sqrt{m}$ 이었다. 이와 같이 짧은 균열에서 급격하게 증가하였으나, 약 0.1 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다.

Fig. 2는 초고장력강(UHS steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 길이(c)와의 관계이다. 이것은 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다. 균열 길이(c)는 균열 깊이(a)의 결과와 반대의 경향이 나타났다. 즉, As=1.0의  $\Delta K_{th}$ 가 크게 나타났다. 즉, R=0에서 As=1.0은 0.01 mm에서 3.07 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 4.94 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 5.29 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 5.61 MPa  $\sqrt{m}$  이고, As=0.3은 0.03 mm에서 1.96 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 2.60 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 3.40 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 3.87 MPa  $\sqrt{m}$ , 1.7 mm에서 5.66 MPa  $\sqrt{m}$ 이었다. 한편 즉, R=0.5에서 As=1.0은 0.01 mm에서 1.65 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06 mm에서 3.04 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.1 mm에서 3.39 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.2 mm에서 3.74 MPa  $\sqrt{m}$  이고, As=0.3은 0.03 mm에서 1.01 MPa  $\sqrt{m}$ , 0.06

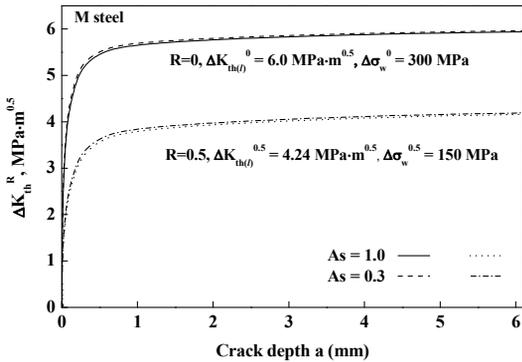


Fig. 3 Relationship of crack depth and  $\Delta K_{th}$  of mild steel (M steel) in case of  $2W=50$  mm,  $t=10$  mm

mm에서  $1.39 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $1.85 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $2.18 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 1.7 mm에서  $3.67 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이었다.  $As=1.0$ 의  $\Delta K_{th}$ 는 균열 길이(c)와 균열 깊이(a)가 비슷하였으나,  $As=0.3$ 은 균열 길이(c)가 작게 나타났다. 이와 같이 균열 깊이에 대한  $\Delta K_{th}$ 는  $As$ 에 관계없이 비슷하였으나, 균열 길이는  $As$ 가 작은 것이 작게 나타났다. 균열 깊이와 마찬가지로 균열 길이도 짧은 균열에서 급격하게 증가하였다. 반면  $As=1.0$ 의  $R=0$ 와  $0.5$ 는 약 0.1 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였으나,  $As=0.3$ 의  $R=0$ 는 약 1 mm,  $R=0.5$ 는 약 1.5 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다.

Fig. 3은 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력 확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 깊이(a)와의 관계이다. 이것은 초고장력강과 마찬가지로 응력비(R) 0와 0.5, 균열 중횡비( $As$ ) 1.0과 0.3의 결과이다.

$\Delta K_{th}$ 는 초고장력강과 마찬가지로 응력비에 관계없이  $As=0.3$ 이 약간 크게 나타났다. 즉,  $R=0$ 에서  $As=1.0$ 은 0.01 mm에서  $1.85 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $3.73 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $4.29 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $4.93 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.5 mm에서  $5.49 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이고,  $As=0.3$ 은 0.01 mm에서  $1.96 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $3.86 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $4.41 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm  $5.02 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.5 mm

에서  $5.54 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이었다. 한편,  $R=0.5$ 에서  $As=1.0$ 은 0.01 mm에서  $0.95 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $2.08 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $2.49 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $3.03 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 1 mm에서  $3.89 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이고,  $As=0.3$ 은 0.01 mm에서  $1.00 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $2.17 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $2.59 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm  $3.12 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 1 mm에서  $3.93 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이었다. 이와 같이 작은균열에서 급격하게 증가하였으나, 약 0.3 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다. 그러나 연강은 초고장력강에 비하여 짧은 균열에서도 완만하게 증가하는 경향을 나타내어, 강도에 따른 특성이 나타나는 것이라고 판단된다.

Fig. 4는 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력 확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 길이(c)와의 관계이다. 이것은 응력비(R) 0와 0.5, 균열 중횡비( $As$ ) 1.0과 0.3의 결과이다. 균열 길이(c)는 초고장력강과 마찬가지로 균열 깊이(a)의 결과와 반대의 경향이 나타났다. 즉,  $As=1.0$ 의  $\Delta K_{th}$ 가 크게 나타났다. 즉,  $R=0$ 에서  $As=1.0$ 은 0.01 mm에서  $1.83 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $3.69 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $4.26 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $4.91 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이고,  $As=0.3$ 은 0.03 mm에서  $1.10 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $1.50 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $2.00 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2

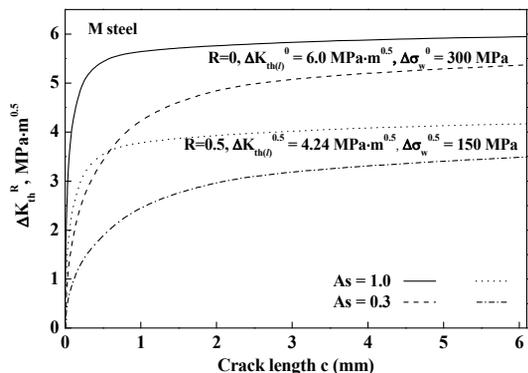


Fig. 4 Relationship of crack length and  $\Delta K_{th}$  of mild steel (M steel) in case of  $2W=50$  mm,  $t=10$  mm

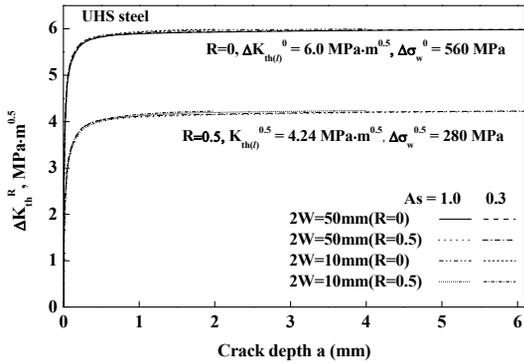


Fig. 5 Relationship of crack depth and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) in case of  $2W=50$  mm and 10 mm

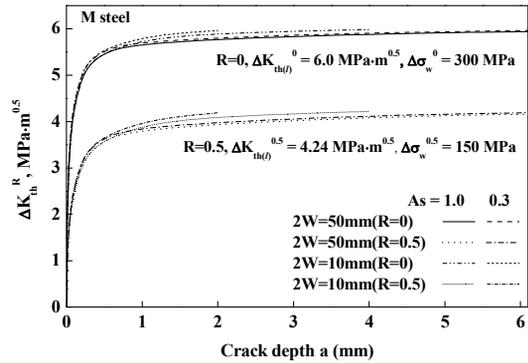


Fig. 7 Relationship of crack depth and  $\Delta K_{th}$  of mild steel (M steel) in case of  $2W=50$  mm and 10 mm

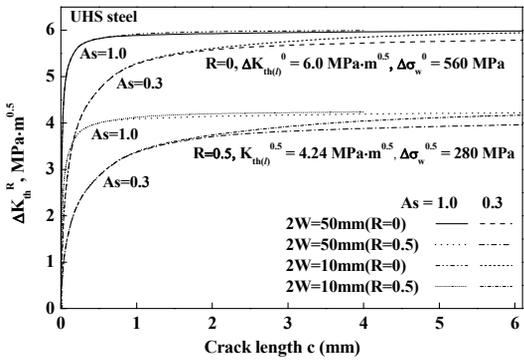


Fig. 6 Relationship of crack length and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) in case of  $2W=50$  mm and 10 mm

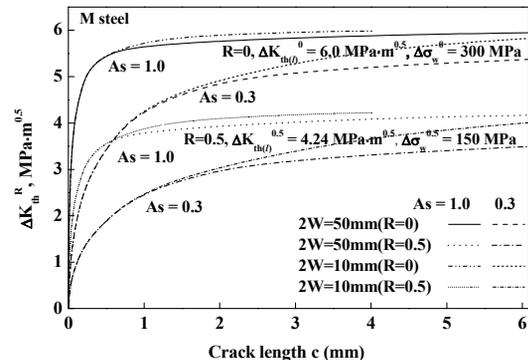


Fig. 8 Relationship of crack length and  $\Delta K_{th}$  of mild steel (M steel) in case of  $2W=50$  mm and 10 mm

mm에서  $2.48 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 1.7 mm에서  $4.77 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이었다. 한편 즉, R=0.5에서 As=1.0은 0.01 mm에서  $0.94 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $2.05 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $2.46 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $3.01 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이고, As=0.3은 0.03 mm에서  $0.55 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.06 mm에서  $0.75 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.1 mm에서  $1.05 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 0.2 mm에서  $1.30 \text{ MPa} \sqrt{m}$ , 1.7 mm에서  $2.89 \text{ MPa} \sqrt{m}$  이었다. As=1.0의  $\Delta K_{th}$ 는 초고장력강과 마찬가지로 균열 길이(c)와 균열 깊이(a)가 비슷하였으나, As=0.3은 균열 길이(c)가 작게 나타났다. Fig. 5는 초고장력강(UHS steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 깊이

(a)와의 관계이다. 이것은 판폭  $2W=50$  mm와 10 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다.  $\Delta K_{th}$ 는 판폭 및 응력비에 관계없이 As=0.3이 근소하지만 약간 크게 나타났다.  $\Delta K_{th}$ 는 작은 균열에서 급격하게 증가하였으나, 약 0.2 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다. 이와 같이 균열 깊이에 대한  $\Delta K_{th}$ 는 판폭 및 균열 종횡비에 의존하지 않고 일정하다는 것을 알 수 있다.

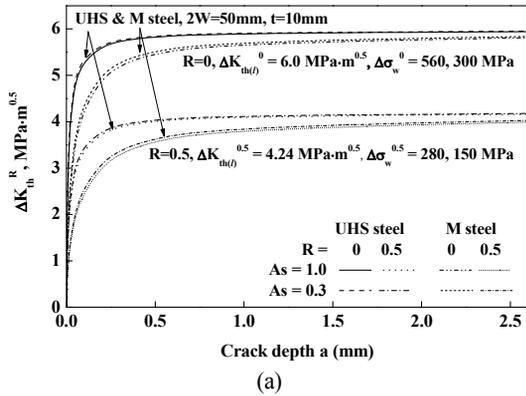
Fig. 6은 초고장력강(UHS steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 길이(c)와의 관

계이다. 이것은 판폭 2 W=50 mm와 10 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다. 균열 길이(c)의  $\Delta K_{th}$ 는 응력비에 관계없이 짧은 균열길이에서 As=0.3이 As=1.0보다 크게 나타났다.

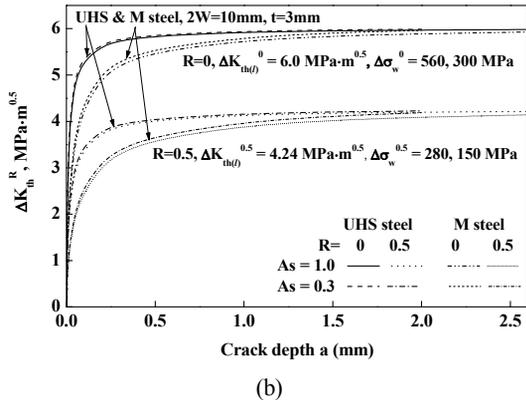
Fig. 7은 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력 확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 깊이(a)와의 관계이다. 이것은 판폭 2 W=50 mm와 10 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다. 초고장력강(UHS steel)과 마찬가지로 균열 깊이에 대한  $\Delta K_{th}$ 는 판폭 및 응력비에 관계없이 As=0.3이 근소하지만 약간 크게 나타났다.  $\Delta K_{th}$ 는 작은 균열에서 급격하

게 증가하였으나, 약 0.4 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다. 이와 같이 균열 길이에 대한  $\Delta K_{th}$ 는 판폭 및 균열 종횡비에 의존하지 않고 일정하다는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력 확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 길이(c)와의 관계이다. 이것은 판폭 2 W=50 mm와 10 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0와 0.5, 균열 종횡비(As) 1.0과 0.3의 결과이다. 균열 길이(c)의  $\Delta K_{th}$ 는 응력비에 관계없이 짧은 균열길이에서 증가하였으며, 1 mm 이후에서 As=1.0이 As=0.3보다 크게 나타났다. 그리고 판폭 2 W=50 mm가 2 W=10 mm보다 급격하게 증가하였다. 이것은 판폭과 두

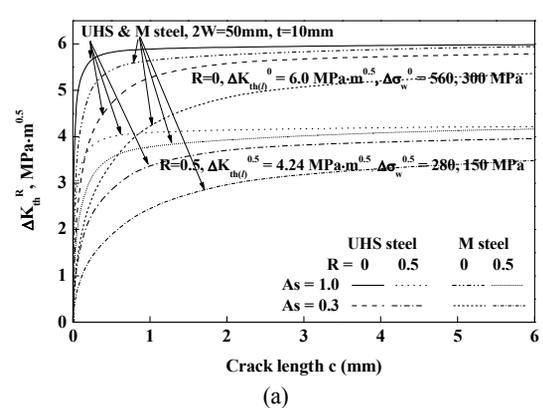


(a)

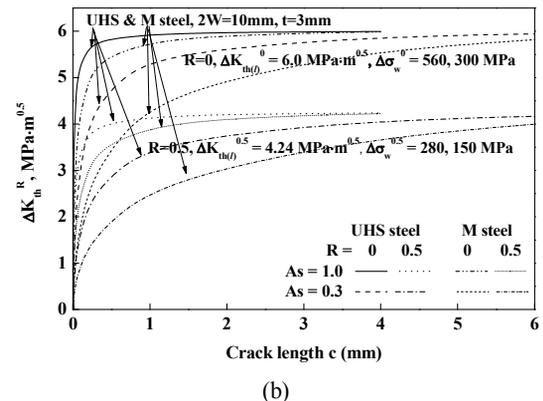


(b)

Fig. 9 Relationship of crack depth and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) and Mild steel (M steel). (a) 2 W=50 mm, t=10 mm, (b) 2 W=10 mm, t=3 mm



(a)



(b)

Fig. 10 Relationship of crack length and  $\Delta K_{th}$  of ultra high strength steel (UHS steel) and Mild steel (M steel). (a) 2 W=50 mm, t=10 mm, (b) 2 W=10 mm, t=3 mm

계의 차이에 의한 영향이라 판단된다.

Fig. 9는 초고장력강(UHS steel) 및 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 깊이(a)와의 관계이다. (a)와 (b)는 각각 판폭 2 W=50 mm, 두께 10 mm와 판폭 2 W=10 mm, 두께 3 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0과 0.5, 균열 종횡비( $A_s$ ) 1.0과 0.3의 결과이다. Fig. 9 (a), (b)에서  $\Delta K_{th}$ 와 균열 깊이(a)에 대한 판폭 및 두께의 영향은 없었다. 즉,  $\Delta K_{th}$ 는 균열 깊이가 증가함에 따라서 비슷하게 증가하여 긴균열의  $\Delta K_{th}$ 로 수렴하고 있다. 초고장력강(UHS steel)의  $\Delta K_{th}$ 는 짧은 균열 구간에서 연강(M steel)보다 크게 나타났으며, 긴균열이 될수록 비슷해지고 있다. 그리고  $\Delta K_{th}$ 는 강종 및 시험편 크기에 관계없이 균열종횡비 0.3이 1.0보다 약간 크게 나타났다. Fig. 10은 초고장력강(UHS steel) 및 연강(M steel)에서 얻어진 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )와 균열 길이(c)와의 관계이다. (a)와 (b)는 각각 판폭 2 W=50 mm, 두께 10 mm와 판폭 2 W=10 mm, 두께 3 mm에 따르는 영향을 비교한 것으로, 응력비(R) 0과 0.5, 균열 종횡비( $A_s$ ) 1.0과 0.3의 결과이다.

Fig. 10 (a), (b)에서  $\Delta K_{th}$ 와 균열 길이(c)에 대한 판폭 및 두께의 영향은 없었다. 단, 판폭 2 W=10 mm와 두께 3 mm의  $A_s=1.0$ 은 균열 길이 4 mm에서 긴균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다. 이것은 두께의 영향이다. 그러나 균열 깊이와 마찬가지로  $\Delta K_{th}$ 는 균열 깊이가 증가함에 따라서 강종 및 종횡비 및 응력비에 관계없이 증가하여 긴균열의  $\Delta K_{th}$ 로 수렴하고 있다. 초고장력강(UHS steel)의  $\Delta K_{th}$ 는 짧은 균열 구간에서 연강(M steel)보다 훨씬 크게 나타났으며, 전 균열 길이에서 크게 나타났다. 균열이 될수록 비슷해지고 있다. 그리고  $\Delta K_{th}$ 는 강종 및 시험편 크기에 관계없이 균열종횡비 1.0이 0.3보다 훨씬 크게 나타나, 균열 깊이와 반대현상이다. 이것은 응력이 작용하는 표면균열의 응력확대계수는 깊이보다 더 크게 나타나기 때문이다.

## 4. 결 론

본 연구는 소성거동을 비선형문제로 취급한 식을 사용하여, 시험편 치수, 균열 종횡비( $A_s$ ) 및 응력비(R)에 따르는 임의의 균열에 대한 하한계응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )의 영향을 평가하였다.

1) 초고장력강(UHS steel)의  $\Delta K_{th}$ 는 짧은 균열 깊이 및 길이에서 급격하게 증가하였다. 균열 깊이는 균열 종횡비( $A_s$ ) 및 응력비(R)에 관계없이 약 0.1 mm에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다. 균열 길이는 균열 종횡비에 따라서 다르게 나타났다.  $A_s=1.0$ 은 균열 깊이와 같은 경향을 나타내었으나,  $A_s=0.3$ 은 약 1 mm(R=0), 약 1.5 mm(R=0.5)에서 완만하게 증가하여 긴 균열의  $\Delta K_{th}$ 에 수렴하였다.

2) 연강(M steel)은 초고장력강에 비하여 짧은 균열 깊이 및 길이에서 완만하게 증가하는 경향을 나타내어, 재료 강도에 따라 다른 특성이 나타났다.

3) 초고장력강(UHS steel) 및 연강(M steel)의  $\Delta K_{th}$ 는 판폭 및 균열 종횡비에 의존하지 않고 일정하였다.

4) 균열 깊이에 대한  $\Delta K_{th}$ 는 강종 및 시험편 크기에 관계없이 균열종횡비 0.3이 1.0보다 약간 크게 나타났다. 균열 길이는 균열종횡비 1.0이 0.3보다 훨씬 크게 나타났다.

## Author contributions

K. W. Nam; Writing-review & editing, J. Y. Hyun; Writing-original draft and conceptualization, M. H. Kim; Investigation and calculation.

## References

1. K. J. Miller, 1982, "The Short Crack Problem", Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, Vol. 5, pp. 223-232. (DOI:10.1111/j.1460-2695.1982.tb01250.x)

2. S. Suresh and R. O. Ritchie, 1984, "Propagation of short fatigue cracks", *International Metals Reviews*. Vol. 29, Issue 1, pp. 445-476. (DOI:10.1179/imtr.1984.29.1.445)
3. N. E. Frost and J. R. Dixon, 1966, "Fatigue Crack Propagation in Metals", *Nature*, Vol. 212, pp. 1569-1570.
4. H. Kitagawa and S. Takahashi, 1976, "Applicability of fracture mechanics to very small cracks or cracks in the early stage", *Proceedings of the second international conference on mech. behaviour of matls.*, ASM; 1976. pp. 627-631.
5. M. H. El Haddad, T. H. Topper and K. N. Smith, 1979, "Prediction of non propagating cracks", *Engineering fracture mechanics*, Vol. 11, Issue 3, pp. 573-584. (DOI:10.1016/0013-7944(79)90081-X)
6. K. Tokaji, T. Ogawa, Y. Harada and Z. Ando, 1986, "Limitations of Linear Elastic Fracture Mechanics in Respect of Small Fatigue Cracks and Microstructure", *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, Vol. 9, pp. 1-14. (DOI:10.1111/j.1460-2695.1986.tb01207.x)
7. N. Pugno, M. Ciavarella, P. Cornetti and A. Carpinteri, 2006, "A generalized Paris' law for fatigue crack growth", *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 54, Issue 7, pp. 1333-1349. (DOI:10.1016/j.jmps.2006.01.007)
8. E. Pessard, D. Bellett, F. Morel and I. Koutiri, 2013, "A mechanistic approach to the Kitagawa - Takahashi diagram using a multiaxial probabilistic framework", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 109, pp. 89-104. (DOI:10.1016/j.engfracmech.2013.06.001)
9. E. Wycisk, A. Solbach, S. Siddique, D. Herzog, F. Walther and C. Emmelmann, 2014, "Effects of Defects in Laser Additive Manufactured Ti-6Al-4V on Fatigue Properties", *Physics Procedia*, Vol. 56, pp. 371-378. (DOI:10.1016/j.phpro.2014.08.120)
10. J. Maierhoferb, H. P. Ganser and R. Pippan, 2015, "Modified Kitagawa - Takahashi diagram accounting for finite notch depths", *International Journal of Fatigue*, Vol. 70, pp. 503-509. (DOI:10.1016/j.ijfatigue.2014.07.007)
11. K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui and K. Takahashi, 2019, "Study on the Unification of the Threshold Stress Intensity Factor for Micro Crack Growth", *Transactions of Japan Society of Spring Engineers*, Vol. 64, pp. 39-44.
12. J. C. Newman Jr. and I. S. Raju, 1981, "An empirical stress intensity factor equation for the surface crack", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185-192.