



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위 논문

레이저 피닝한 STS304의 무해화  
균열 크기 평가



공학석사 학위 논문

# 레이저 피닝한 STS304의 무해화 균열 크기 평가

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2021년 8월

부경대학교 산업대학원

재료공학과

손 대 진

# 이 논문을 손대진의 공학석사 학위논문을 인준함

2021년 8월 27일



주 심 공학박사 안 병 현 (인)

위 원 공학박사 현 재 용 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

# 목 차

Abstract

1. 서론 .....	1
2. 해석 대상 재료, 시험편 및 잔류응력 .....	2
3. 해석 방법 .....	5
4. 해석 결과 및 고찰 .....	10
4.1 미소 균열의 하한계응력확대계수 .....	10
4.2 미소 균열의 피로한도 .....	13
4.2 무해화 가능한 균열 크기 .....	20
5. 결론 .....	30
References .....	31
발표 논문 목록 .....	36
감사의 글	

## Evaluation of harmless crack size of laser-peened STS304

Department of Materials Science and Engineering, Dae-Jin Son

Directed by Professor Ki-Woo Nam

This study evaluated the threshold stress intensity factor  $\Delta K_{th}$  and fatigue limit  $\sigma_{wc}$  according to the micro crack length when micro crack exist in the STS304 steel. In addition, the compressive residual stress was introduced by fiber-delivered laser peening, and the harmless crack size ( $a_{hlm}$ ) was evaluated. Ando equation and Tange equation were used for evaluation. The threshold stress intensity factor and fatigue limit by the two equations were almost similar. The harmless crack size ( $a_{hlm}$ ) was similar even when evaluated by Ando and Tange equations. The harmless crack size ( $a_{hlm}$ ) was approximately  $a = 1.2$  mm in the residual stress of the  $\sigma_x$  direction and approximately  $a = 1.25$  mm in the residual stress of the  $\sigma_y$  direction.

# 1. 서론

구조물은 사용 중에 심각한 문제가 종종 발생한다. 반복하중을 받는 강 구조물은 제조 중의 결함이나 사용 중의 결함으로 피로 파괴가 발생한다. 이와 같은 피로 파괴는 파괴의 약 90%가 되며, 결함에 의한 피로 파괴 방지가 필요하다. 내구성과 피로 특성을 향상을 위한 다양한 종류의 표면 처리 방법이 연구되고 있다.

피닝 (Peening) 공정은 표면 처리 기술로 잘 알려져 있으며,[1] 기계 부품이나 구조물에서 예기치 않은 파괴가 발생하는 것을 방지할 수 있다. Okada 등은 메탈 벨로우즈에 쇼트 피닝(Shot Peening : SP)을 실시하여, 피로한도가 증가하는 것을 연구하였다.[2] Mono 등은 SP에 의하여 형성된 나노 결정상이 피로 강도에 미치는 영향을 연구하였다.[3] Takahashi 등은 표면 인공 결함에 피닝하여, 피로한도를 평가하였다. 이같이 표면 결함이 있는 재료는 SP 처리로 피로 강도가 향상되었다.[4-6] 더욱이 표면 결함을 무해화할 수 있다면, 구조 부재의 신뢰성은 크게 향상되고, 가격이 저렴하게 될 수 있다. 이와 같은 관점에서 SP [7-9] 및 캐비테이션 피닝[10]에 의한 표면 균열 무해화 연구가 실시되었다. 무해화 가능 균열 크기는 피닝에 의한 압축잔류 응력분포에 의존하였다.[11] 또한, 피닝은 응력부식 균열 감수성을 감소시키기 위하여 원자력 발전 플랜트의 반응기 슈라우드(Shroud)에 적용하고 있다.[12,13] Micheal 등은 레이저 피닝에 의한 압축 잔류응력 분포를 평가하였으며,[14] Zhang 등은

레이저 피닝한 Ti-6Al-4V alloy의 피로한도를 평가하였다.[15] 그러나 레이저 피닝에 의한 압축잔류 응력분포에 의한 무해화 가능 균열 크기에 관한 연구는 없다.

본 연구는 오스테나이트계 STS304 강에 미소 균열이 존재할 경우, 미소 균열 길이에 따르는 하한계응력확대계수 및 피로한도를 평가하였다. 또한, 광섬유 전달 레이저 피닝으로 압축잔류응력을 도입하여, 무해화 가능 균열 크기( $a_{lim}$ )를 평가하였다.

## 2. 해석 대상 재료, 시험편 및 잔류응력

평가 구조 모델은 Fig. 1과 같이 판폭  $2W=24\text{mm}$ , 두께  $t=4\text{mm}$ 이고, 응력비  $R=0$ 의 굽힘응력을 받는 경우이다. 시험편은 STS304로서 반타원형 표면균열 부분에 피닝된 것으로 가정한다. 시험편 표면은 균열 깊이( $a$ ), 균열 길이( $2c$ )의 반타원형 표면균열이 존재하는 것으로 가정한다. 균열 형상비(aspect ratio;  $As=a/c$ )는 1.0, 0.6 및 0.4로 가정한다. 압축 잔류응력은 광섬유 전달 레이저 피닝 장치로 도입[16]한 경우를 가정하였다.

Fig. 2는 레이저 피닝의 기본 공정을 나타낸다. 레이저 충격파는 금속 내부로 전파되면서 영구적인 변형을 만들고 에너지를 잃는다. 레이저 충격파는 전파 후에 영구 변형이 생기고, 주변의 금속

재료는 탄성 변형에 대한 반응으로 레이저-조사된 제한 영역에 압축 응력을 형성한다.

Fig. 3은 측정된 압축잔류응력을 나타낸다. 압축잔류응력은 표면에서 z축인 두께 방향으로 측정하였으며, x축(레이저 진행 방향과 평행) 및 y축(레이저 진행 방향과 수직) 값을 나타낸다. 압축잔류응력은 피닝 전에 존재하였던 인장잔류응력의 영향을 받지 않는 것으로 가정하였다.

비 피닝 시험편(이후, Non.SP)의 피로한도 $\sigma_w$ 는 260MPa이고,[17] 긴 균열의 하한계응력확대계수 $K_{th(l)}$ 는  $5.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 로 하였다.[18]

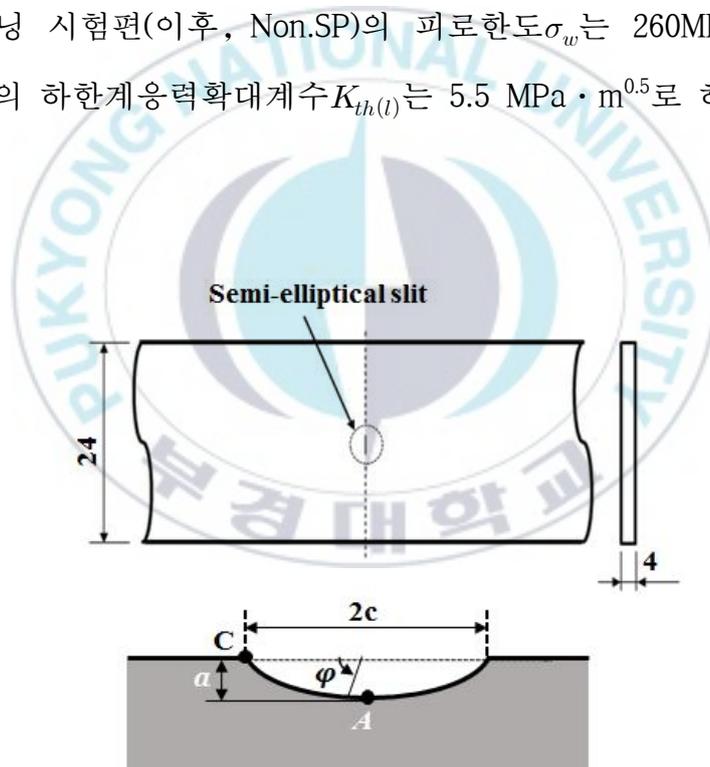
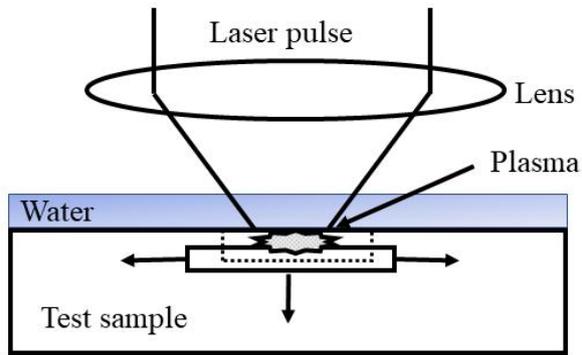
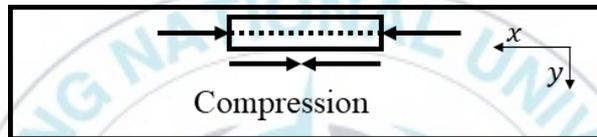


Fig. 1. Schematic of a finite plate containing a semi-elliptical crack.



During laser peening



After laser peening

Fig. 2. Schematic of laser peening.

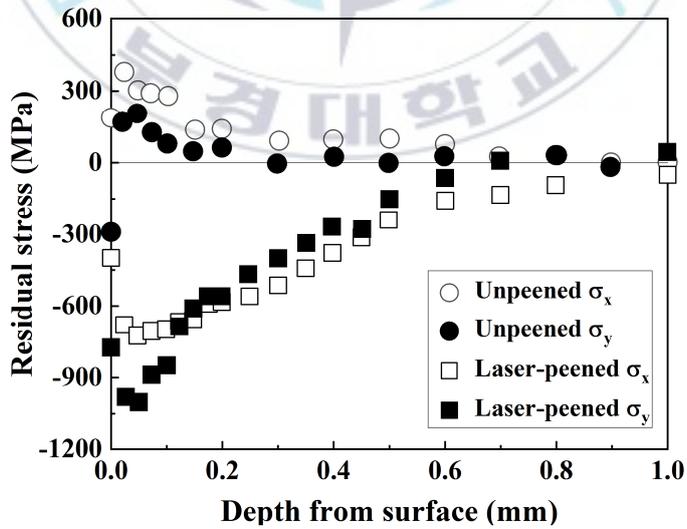


Fig. 3. Residual stress by laser peening.

### 3. 해석 방법

Ando 등은 길이( $2l$ )의 관통균열이 존재하는 무한판에서, 피로균열 진전의 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th(s)}$ )의 균열 길이 의존성을 나타내는 식(1)을 제안하였다.[19-22] 아래 식은 응력비  $R$ 의 경우이다.

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

여기서,  $\Delta K_{th(s)}^R$  및  $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 각각 짧은 균열 및 긴 균열의 하한계응력확대계수,  $\Delta\sigma_w^R$ 은 Non.SP의 피로한도,  $l$ 은 무한판 중의 관통균열 길이 절반이다.

무한판에서  $R$ 의 경우, 균열 시험편의 피로한도( $\Delta\sigma_{uc}^R$ )는 식(2)로 구할 수 있다.[19-22]

$$\Delta K_{th}^R = \Delta\sigma_{uc}^R \sqrt{\pi l} \quad (2)$$

여기서,  $\Delta K_{th}^R$ 은 짧은 균열의 하한계응력확대계수이지만, 긴 균열의 하한계응력확대계수는  $\Delta K_{th(l)}^R$ 이다.

식(1) 및 (2)를 유한판의 반타원형 균열에 적용하는 경우는 식(3)에 주어지는 등가균열길이( $l_e$ )를 식(2) 및 (3)의  $l$ 에 대입한다.[19-22]

$$\sqrt{\pi l_e} = \beta_A \sqrt{\pi a} \quad (3)$$

여기서,  $a$ 는 반타원형 균열 깊이,  $\beta_A$ 는 유한판의 시험편이 굽힘 응력을 받는 경우에 Fig. 4와 같은 균열 최심부(A점)에서 Newman-Raju 식[23]으로 주어지는 형상보정계수이다. 최표면부(C점)의  $l_e$ 를 평가하는 경우에는  $\beta_A$ 를  $\beta_C$ 로 치환하면 된다.[19]  $\beta_A$ 와  $\beta_C$ 는 식(4)로 주어진다.

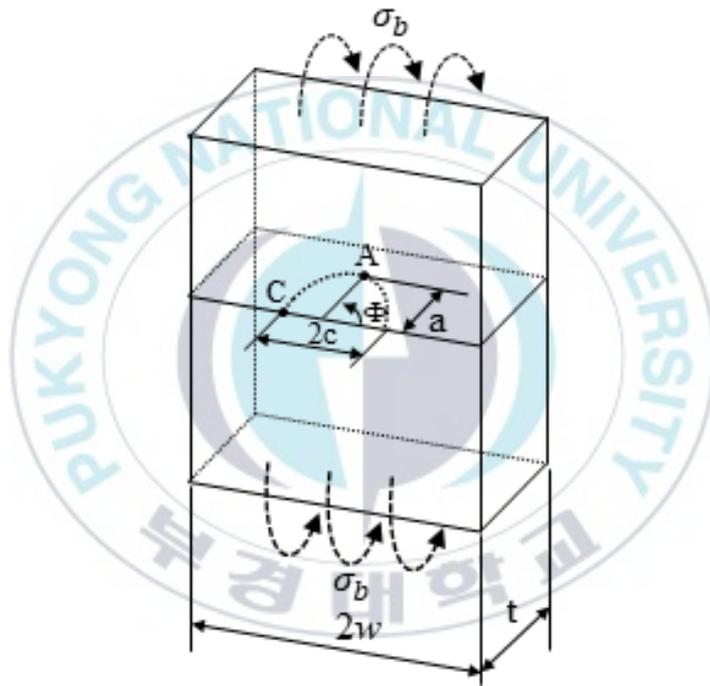


Fig. 4. Schematic of a finite plate containing a semi-circular crack.

$$K = \frac{H\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \phi\right) F\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{c}{w}, \phi\right)}{\sqrt{Q\left(\frac{a}{c}\right)}} \sigma_B \sqrt{\pi a} = \beta \sigma_B \sqrt{\pi a} \quad (4)$$

여기서, H, F 및 Q는 Newman-Raju 식[23]에서 주어지고,  $\beta_A$ 는  $\phi = 90^\circ$ ,  $\beta_C$ 는  $\phi = 0^\circ$ 를 대입한다.  $w$ 는 판폭의 절반이다.

한편, Tange 등[24]은 Haddad 등[25]의 식을 수정하여,  $\Delta K_{th}$ 와  $\Delta\sigma_w^R$ 의 관계식을 유도하였다. Haddad 등은 균열 길이  $l$ 에 미소균열길이  $l_o$ 를 더한  $l+l_o$ 에서,  $\Delta K_{th}$ 의 균열길이 의존성에 관한 식(5)를 제안하였다.[24]

$$\Delta\sigma_{ud}^R = \frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\gamma\sqrt{\pi(l+l_o)}} \quad (5)$$

$$\Delta K = \gamma\Delta\sigma\sqrt{\pi l} \quad (6)$$

$$l_o = (1/\pi)(\Delta K_{th(l)}^R/\gamma\Delta\sigma_w^R)^2 \quad (7)$$

여기서  $\gamma$ 는 형상보정함수,  $\Delta\sigma_{ud}^R$ 은 균열길이  $l$ 일 때의 피로한도이다.

Tange 등은 식(7)을 식(5)에 대입하여, 식(8)을 얻었다.[24]

$$\Delta K_{th}^R = \gamma\Delta\sigma_{uc}^R\sqrt{\pi l} = \frac{\Delta K_{th(l)}^R\sqrt{l}}{\left[l + \frac{1}{\pi}\left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\gamma\Delta\sigma_w^R}\right)^2\right]^{0.5}} \quad (8)$$

깊이  $a$ 의 반타원 표면균열이 존재하는 유한판의  $\Delta K_{th}^R$ 의 평가는  $l$ 대신에  $a$ 를 대입하고,  $\gamma$ 는 식(4)를 대입한다.

피닝으로 무해화되는 균열길이는 파괴역학적으로 평가할 수 있

다. 피닝한 반원형 균열은 반복응력 및 압축잔류응력에 대하여, 양 (+)의 값만이 피로균열전파에 작용한다. 따라서 피닝 시험편의 균열 정지(무해화) 조건은 식(9)로 나타낸다.

$$\Delta K_{Tr} = K_{ap} + K_r \leq \Delta K_{th} \quad (9)$$

여기서  $K_{ap}$ 는 피로하중 최대의 응력확대계수,  $K_r$ 은 잔류응력에 의한 응력확대계수,  $\Delta K_{th}$ 는 하한계응력확대계수이다.

$K_{ap}$ 는 Newman-Raju식을 사용하여 평가한다.[23]  $K_r$ 은 API-RP579[26]에서 4차 다항식으로 얻어지는 잔류응력분포를 사용하여, 표면균열의 응력확대계수 평가식으로 구한다. 평판 중에 존재하는 반타원 균열의 응력확대계수는 식(10)으로 구한다.

$$K_r = \left[ G_0\sigma_0 + G_1\sigma_1\left(\frac{a}{t}\right) + G_2\sigma_2\left(\frac{a}{t}\right)^2 + G_3\sigma_3\left(\frac{a}{t}\right)^3 + G_4\sigma_4\left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} f_w \quad (10)$$

$$Q = 1.0 + 1.464\left(\frac{a}{c}\right)^{1.65}, \quad f_w = \left\{ \sec\left(\frac{\pi c}{2W} \sqrt{\frac{a}{t}}\right) \right\}^{0.5}$$

여기서  $G_0 \sim G_4$ 는 API-RP579에 의한 응력확대계수의 형상보정계수이다.  $a, c$ 는 각각 반타원 균열의 깊이 및 표면길이이다.  $W, t$ 는 각각 판 폭과 판 두께다.  $\sigma_0 \sim \sigma_4$ 는 식(11)을 사용하여 잔류응력분포를 4차 다항식으로 근사시킨 결과에서 얻어지는 계수이다.

$$\sigma(x) = \sigma_0 + \sigma_1\left(\frac{x}{t}\right) + \sigma_2\left(\frac{x}{t}\right)^2 + \sigma_3\left(\frac{x}{t}\right)^3 + \sigma_4\left(\frac{x}{t}\right)^4 \quad (11)$$

여기서  $x$ 는 균열이 존재하는 표면에서 깊이 방향의 거리이다.  
SP 용접재의 표면균열 무해화 가능 최대균열 치수( $a_{hlm}$ ) 조건은 식(12)이다.

$$\Delta K_{Tr} = \Delta K_{th(s)} \quad (12)$$

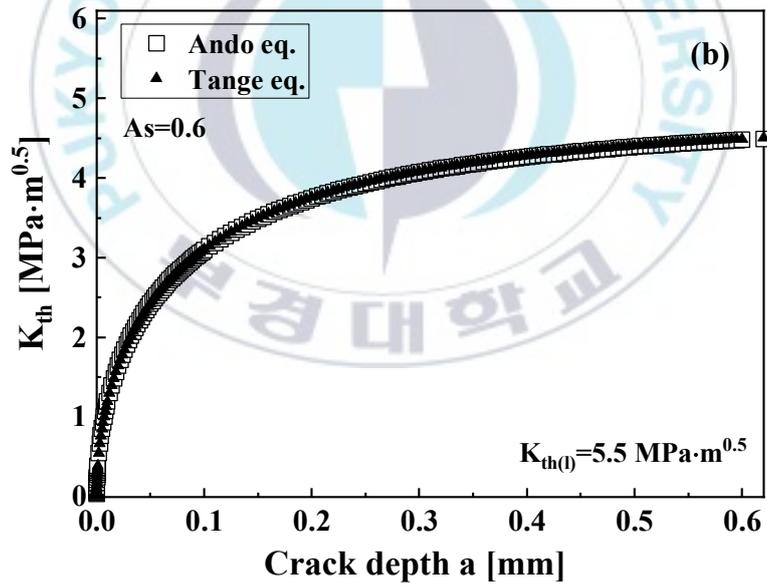
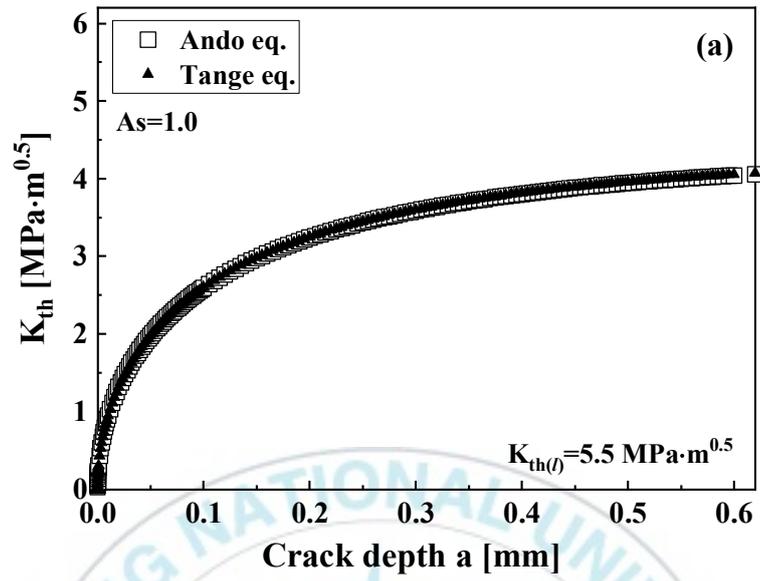
식(12)의 조건은 A점과 C점에서 검토하여, 무해화 가능 균열 치수( $a_{hlm}$ )가 작은 것을 취한다.



## 4. 해석 결과 및 고찰

### 4.1 미소 균열의 하한계응력확대계수

Fig. 5는 Ando 식(1)과 Tange 식(8)을 사용하여, 균열 깊이에 따르는 하한계응력확대계수( $K_{th}$ )의 변화를 나타낸 것이다. (a)는  $A_s=1.0$ , (b)는  $A_s=0.6$ , (c)는  $A_s=0.4$ 의 경우이다. Table 1은 Fig. 5(a),(b),(c)에서 균열 깊이 0.05, 0.1, 0.2, 0.3 및 0.5mm에 상당하는  $K_{th}$ 를 나타낸다. 각  $A_s$ 에서 두 식에 의한  $K_{th}$ 의 차이는 없고, 거의 비슷하게 나타났다. 그러나  $A_s$ 가 작을수록 작은 균열에서  $K_{th}$ 가 급격하게 증가하였고, 균열이 증가함에 따라서 긴 균열의 하한계응력확대계수( $K_{th(l)}$ )에 수렴하였다. 즉, 균열 깊이  $a=0.05\text{mm}$ 에서  $A_s=1.0$ 은 약  $1.98 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.6$ 은 약  $2.42 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.4$ 는 약  $2.66 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 이다.  $a=0.1\text{mm}$ 에서  $A_s=1.0$ 은 약  $2.60 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.6$ 은 약  $3.10 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.4$ 는 약  $3.35 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 이다.  $a=0.5\text{mm}$ 에서  $A_s=1.0$ 은 약  $3.96 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.6$ 은 약  $4.40 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ ,  $A_s=0.4$ 는 약  $4.60 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 이다. 이와같이  $K_{th(l)}$ 에 수렴하는 균열 깊이는 균열 형상에 의존한다.  $K_{th(l)}$ 은 고강도 강일수록 작은 균열에서 급격하게 증가하여 수렴한다. 즉,  $K_{th(l)}$ 가 작을수록, 피로한도( $\Delta\sigma_w$ )가 클수록  $K_{th}$ 가  $K_{th(l)}$ 에 수렴하는 균열 깊이는 작아진다.



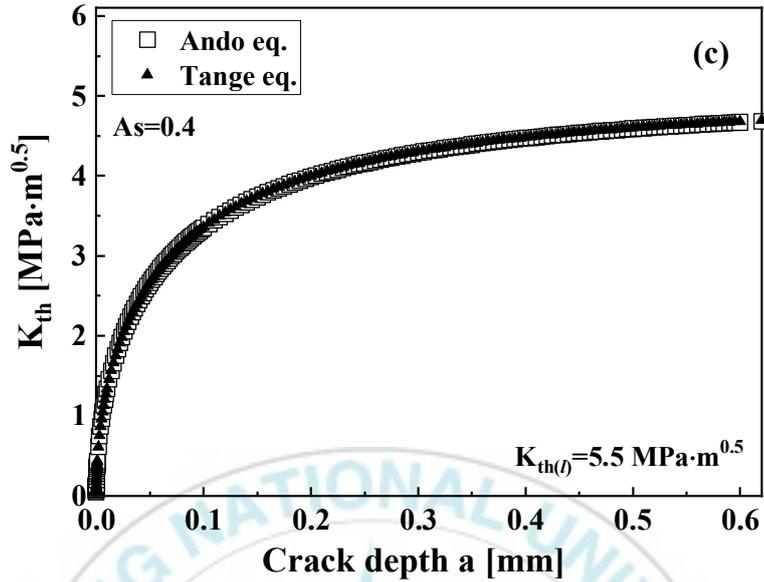


Fig. 5. Crack depth dependence of threshold stress intensity factor ( $K_{th}$ ) by Ando and Tange equations. (a)  $As=1.0$ , (b)  $As=0.6$ , (c)  $As=0.4$ .

Table 1. Threshold stress intensity factor ( $K_{th}$ ) according to  $As=1.0$ ,  $0.6$ , and  $0.4$  at each crack depth (0.05, 0.1, 0.2, 0.3 and 0.5mm).

Depth(mm)	$As=1.0$		$As=0.6$		$As=0.4$	
	Eq.(1)	Eq.(8)	Eq.(1)	Eq.(8)	Eq.(1)	Eq.(8)
0.05	1.977	1.980	2.419	2.425	2.661	2.668
0.1	2.594	2.600	3.094	3.104	3.350	3.362
0.2	3.240	3.251	3.744	3.758	3.984	3.999
0.3	3.587	3.600	4.070	4.084	4.290	3.305
0.5	3.945	3.959	4.391	4.406	4.588	4.602

## 4.2 미소 균열의 피로한도

Fig. 6-8은 Ando 식(2)와 Tange 식(5)를 사용하여, 피로한도( $\sigma_w$ ) 변화를 균열 깊이에 대하여 나타낸 것이다. Fig. 6은  $A_s=1.0$ , Fig. 7은  $A_s=0.6$ , Fig. 8은  $A_s=0.4$ 의 경우이다. Fig. 6-8에서 (a)는 Ando 식에서 얻어진 것이고, (b)는 Tange 식에서 얻어진 것이다. 그림에서  $c$ 는 표면균열 길이를 나타내고,  $a$ 는 균열 깊이를 나타낸다. Table 2-4는 Fig. 6-8(a),(b)에서 균열 깊이 0.1, 0.2, 0.3, 0.4 및 0.5mm에 상당하는  $\sigma_w$ 를 나타낸다. Ando 식과 Tange 식에서 얻은  $c$  및  $a$ 의  $\sigma_w$ 는 균열 깊이에 대하여 비슷하게 감소하였다.

Fig. 6은  $A_s=1.0$ 인 경우, 균열 깊이에 따르는 피로한도이다. 균열 깊이 0.1mm에 대하여  $a$ 와  $c$ 는 각각 Eq. (2)에서 228.49 MPa과 221.89 MPa, Eq. (5)에서 229.10 MPa과 222.55 MPa이다. 균열 깊이 0.3mm에 대하여  $a$ 와  $c$ 는 각각 Eq. (2)에서 195.83 MPa과 180.87 MPa, Eq. (5)에서 196.54 MPa과 181.54 MPa이다. 균열 깊이 0.5mm에 대하여  $a$ 와  $c$ 는 각각 Eq. (2)에서 179.81 MPa과 157.96 MPa, Eq. (5)에서 180.48 MPa과 158.50 MPa이다. 이와 같이  $c$ 의 피로한도가  $a$ 보다 빠르게 감소하였다. 즉,  $A_s=1.0$ 의 표면균열은 굽힘 반복 응력을 받으면, 길이 방향의 성장이 깊이 방향보다 빠르므로 피로한도의 감소가 빠르게 나타난 것이라 판단된다.

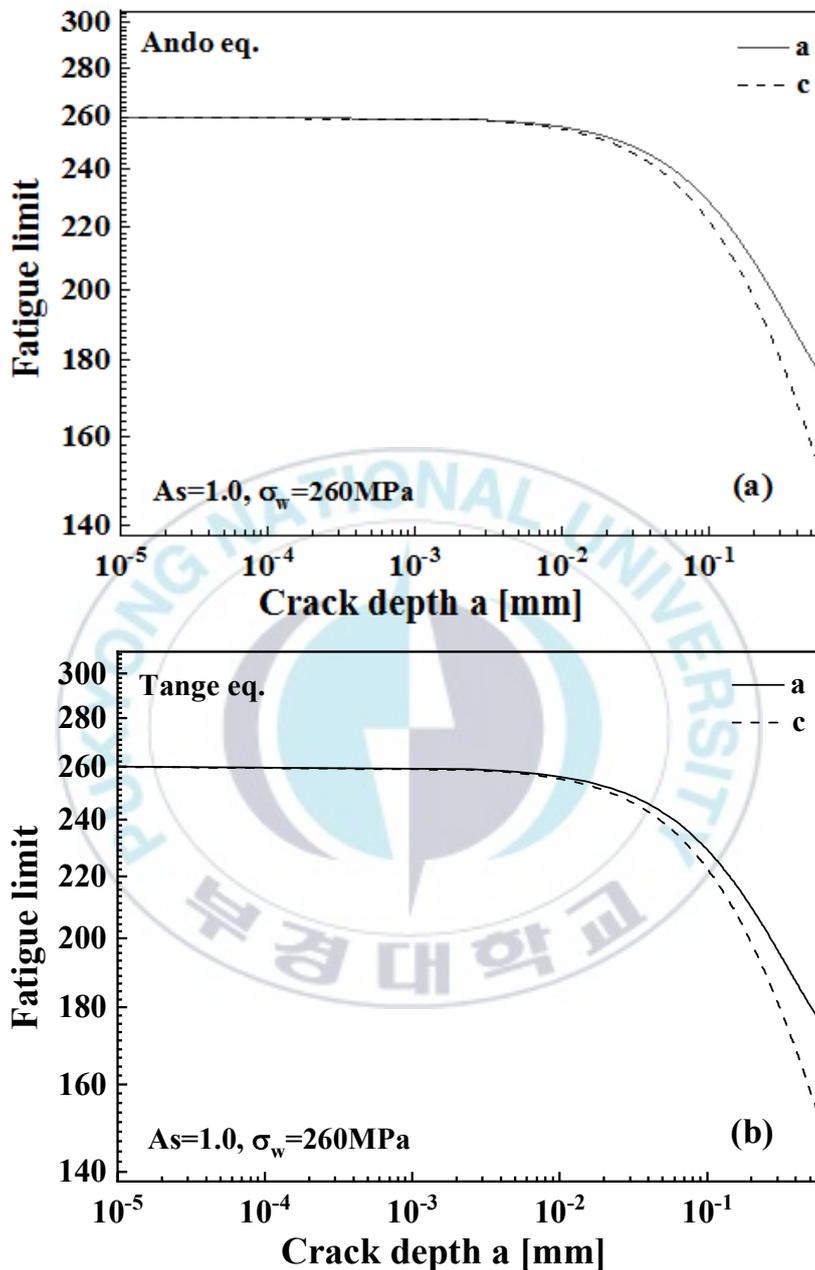


Fig. 6. Crack depth dependence of fatigue limit( $\sigma_w$ ) by Ando and Tange equations in case of  $A_s=1.0$ . (a) Ando equation, (b) Tange equation.

Table 2. Fatigue limit according to each crack depth (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5mm) at  $A_s=1.0$ .

Depth(mm) \ $A_s=1.0$	Eq.(2)		Eq.(5)	
	a	c	a	c
0.1	228.49	221.89	229.10	222.55
0.2	208.99	197.83	209.71	198.56
0.3	195.83	180.87	196.54	181.54
0.4	186.52	168.07	187.22	168.67
0.5	179.81	157.96	180.48	158.50

Fig. 7은  $A_s=0.6$ 인 경우, 균열 깊이에 따르는 피로한도이다. 균열 깊이 0.1mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 213.93 MPa과 222.69 MPa, Eq. (5)에서 214.64 MPa과 223.35 MPa이다. 균열 깊이 0.3mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 173.49 MPa과 181.73 MPa, Eq. (5)에서 174.12 MPa과 182.40 MPa이다. 균열 깊이 0.5mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 155.09 MPa과 158.27 MPa, Eq. (5)에서 155.61.48 MPa과 158.81 MPa이다. 이와 같이  $A_s=0.6$ 의 경우는 a의 피로한도가 c보다 약간 빠르게 감소하였다.  $A_s=0.6$ 과 같은 경우, 균열 깊이와 균열 길이가 동시에 성장하지만, 균열 깊이가 더 빨리 성장하기 때문에 피로한도의 감소가 빠르다. 즉, 균열 깊이가 더 많이 성장하므로 균열 깊이의 피로한도가 약간 빠르게 감소하였다.

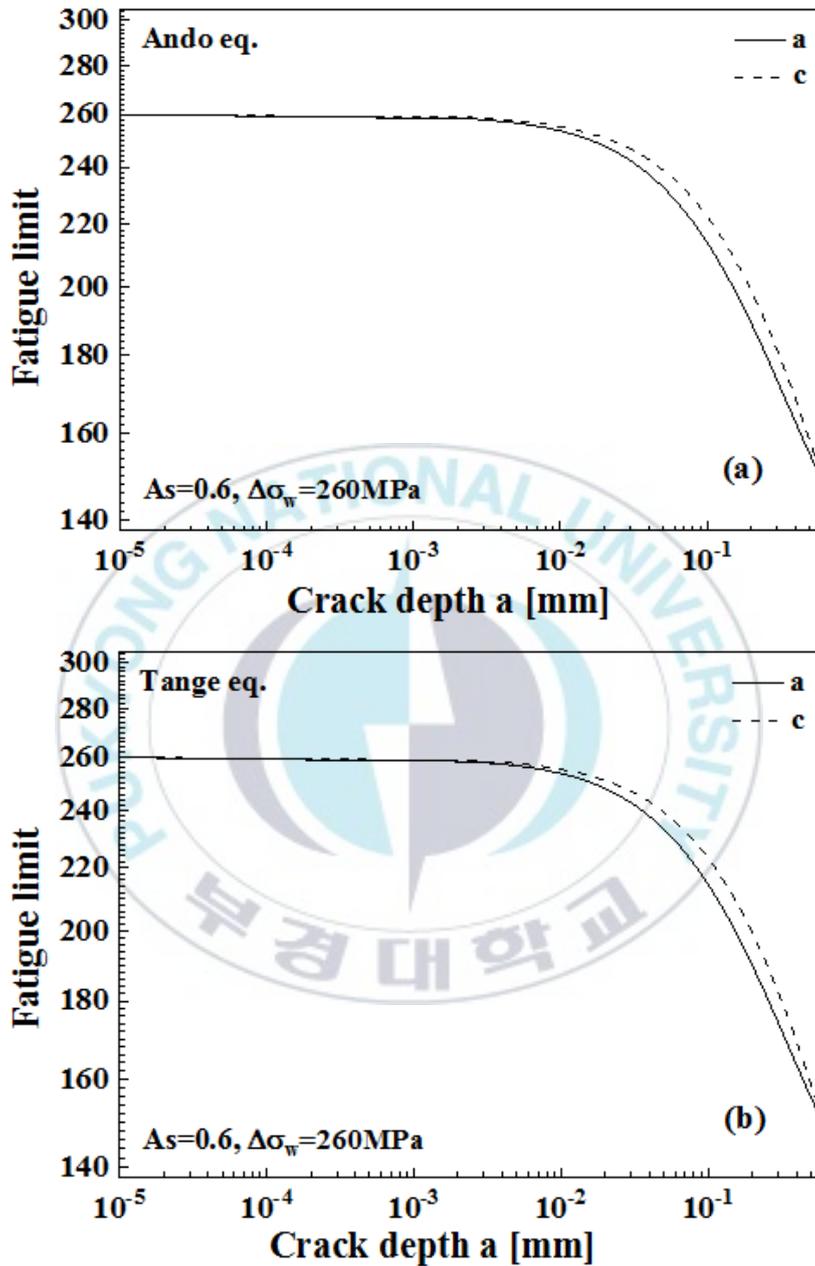


Fig. 7. Crack depth dependence of fatigue limit( $\sigma_w$ ) by Ando and Tange equations in case of  $As=0.6$ . (a) Ando equation, (b) Tange equation.

Table 3. Fatigue limit according to each crack depth (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5mm) at  $A_s=0.6$ .

Depth(mm)	Eq.(2)		Eq.(5)	
	a	c	a	c
0.1	213.93	222.69	214.64	223.35
0.2	189.15	198.79	189.85	199.52
0.3	173.49	181.73	174.12	182.40
0.4	162.77	168.69	163.34	169.30
0.5	155.09	158.27	155.61	158.81

Fig. 8은  $A_s=0.4$ 인 경우, 균열 깊이에 따르는 피로한도이다. 균열 깊이가 0.1mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 205.05 MPa과 227.23 MPa, Eq. (5)에서 205.78 MPa과 227.85 MPa이다. 균열 깊이가 0.3mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 161.27 MPa과 188.76 MPa, Eq. (5)에서 161.83 MPa과 189.46 MPa이다. 균열 깊이가 0.5mm에 대하여 a와 c는 각각 Eq. (2)에서 141.96 MPa과 165.43 MPa, Eq. (5)에서 142.39 MPa과 166.02 MPa이다. 이와 같이  $A_s=0.4$ 의 경우는 a의 피로한도가 c보다 빠르게 감소하였다.  $A_s=0.4$ 와 같이  $A_s$ 가 작아지면, 균열 깊이가 먼저 성장하여 균열 길이에 접근하고, 그러면 동시에 균열이 진전하게 된다. 즉, 균열 깊이가 균열 길이보다 빠르게 성장하므로 균열 깊이의 피로한도가 빠르게 감소하였다. 따라서  $A_s$ 가 작을수록 균열 깊이의 피로한도 감소가 빠르게 나타났다.

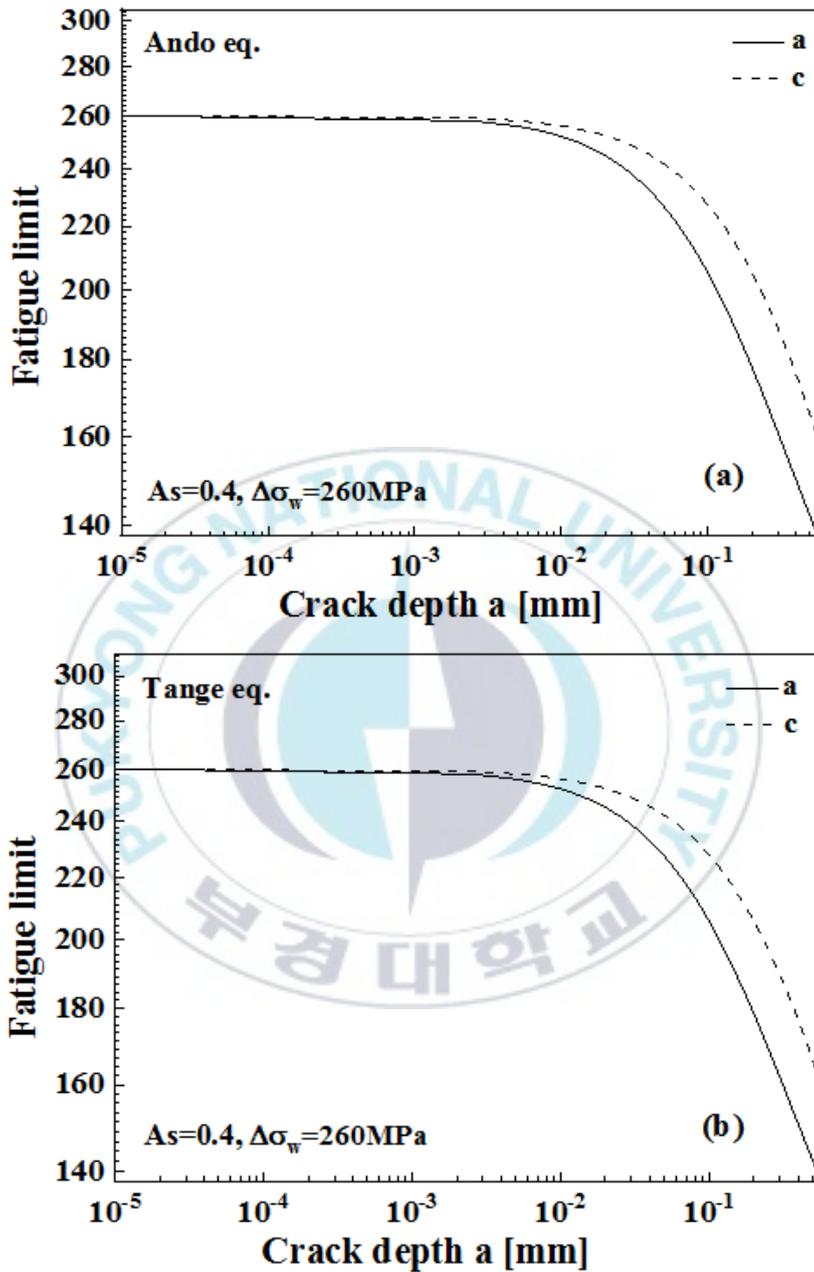
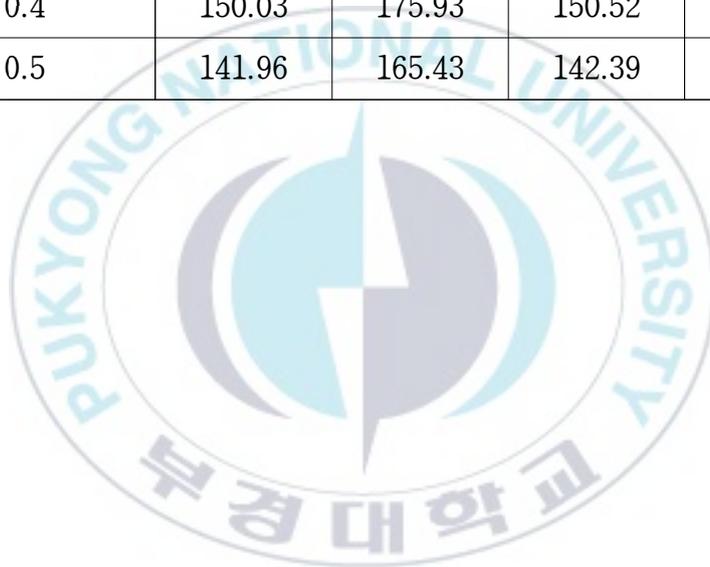


Fig. 8. Crack depth dependence of fatigue limit( $\sigma_w$ ) by Ando and Tange equations in case of  $As=0.4$ . (a) Ando equation, (b) Tange equation.

Table 4. Fatigue limit according to each crack depth (0.1, 0.2, 0.3, 0.4, and 0.5mm) at  $A_s=0.4$ .

Depth(mm)	Eq.(2)		Eq.(5)	
	a	c	a	c
0.1	205.05	227.23	205.78	227.85
0.2	177.87	205.11	178.53	205.84
0.3	161.27	188.76	161.83	189.46
0.4	150.03	175.93	150.52	176.58
0.5	141.96	165.43	142.39	166.02



### 4.3 무해화 가능한 균열 크기

Fig. 9-11은  $A_s=1.0, 0.6$  및  $0.4$ 의 경우, 레이저 피닝(LP)한 용접재의  $K_{th(s)}$ 와 균열 깊이( $a$ )의 관계를 균열최심부(A점)와 균열표면부(C점)에 대하여 식(1)로 평가한 것이다. 또, 잔류응력 영역을 진전하는 균열의 응력확대계수  $K_{Tr}$ 은 식(9)로 평가하였다. (a)는  $\sigma_x$  방향의 잔류응력, (b)는  $\sigma_y$  방향의 잔류응력의 경우이다. 그림에서  $K_{th(s)}$  및  $K_{Tr}$ 은 A점 및 C점에서 평가하여, 각각  $K_{th(s)A}$  및  $K_{th(s)C}$ ,  $K_{TrA}$  및  $K_{TrC}$ 로 나타내었다. 그림에서  $K_{TrA}$ 는 음의 값으로 감소하다가 양의 값으로 증가하여  $K_{th(s)A}$ 와 교차하였다. 이 지점이 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )에 해당한다. Table 5는  $K_{TrA}$ 와  $K_{th(s)A}$ 가 교차한 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )를 나타낸다. Fig. 9의  $A_s=1.0$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.147\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.127\text{mm}$ 이고, Fig. 10의  $A_s=0.6$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.186\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.213\text{mm}$ 이다. Fig. 11의  $A_s=0.4$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.197\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.236\text{mm}$ 이다. Fig. 9의 경우는 (a)의 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )가 (b)보다 깊으나, Figs. 10과 11은 (b)무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )가 (a)보다 깊게 나타났다. 그러나  $K_{TrC}$ 는 음의 값으로 감소하여,  $K_{th(s)C}$ 와 교차하지 않았기 때문에 균열의 진전은 없다. 즉, 본 연구에 사용한 STS304는  $A_s$ 에 따라서 다르지만,  $\sigma_x$  방향의 잔류응력에서 최대 균열 깊이 약  $a=1.2\text{mm}$ ,  $\sigma_y$  방향의 잔류응력에서 최대 균열 깊이  $a=1.25\text{mm}$ 인 표면 균열은 길이에 관계없이 무해화 가능하다.

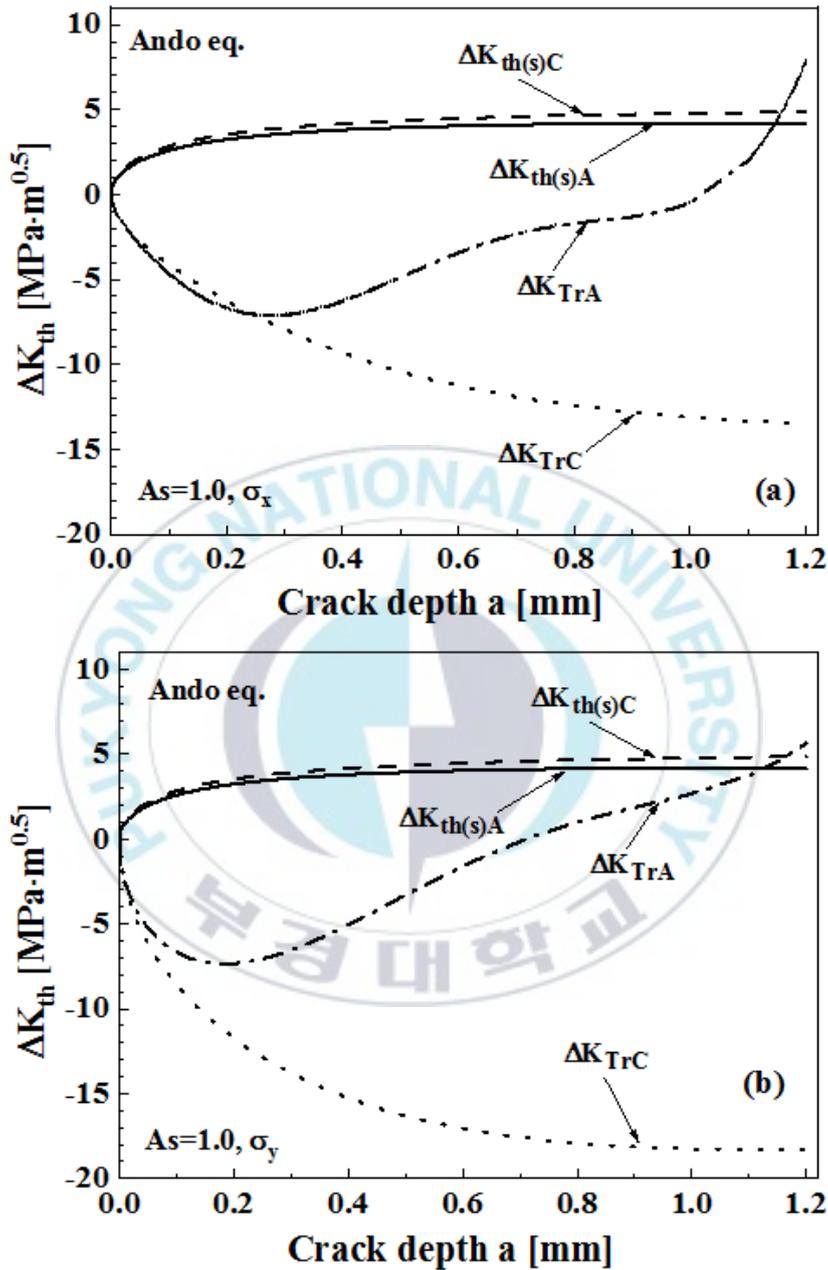


Fig. 9. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $As=1.0$  by Ando equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

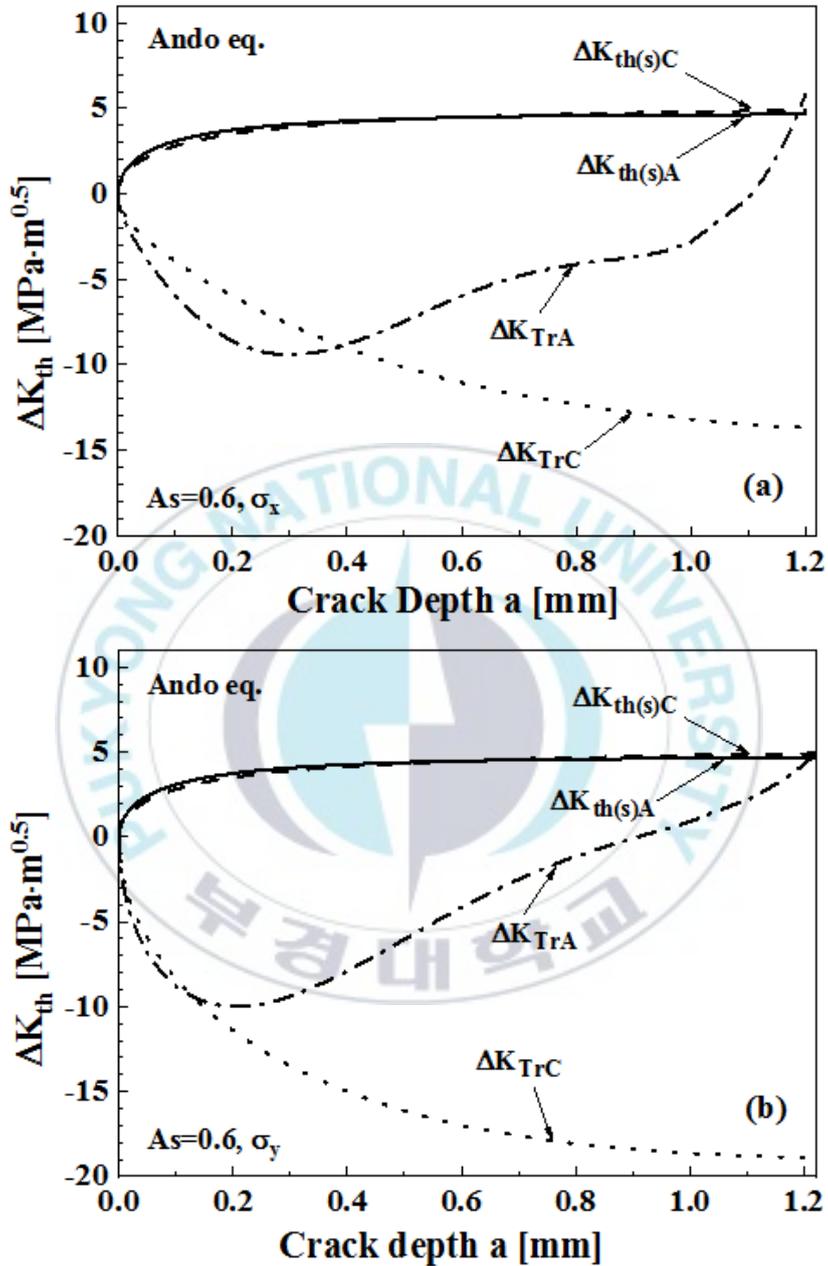


Fig. 10. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $As=0.6$  by Ando equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

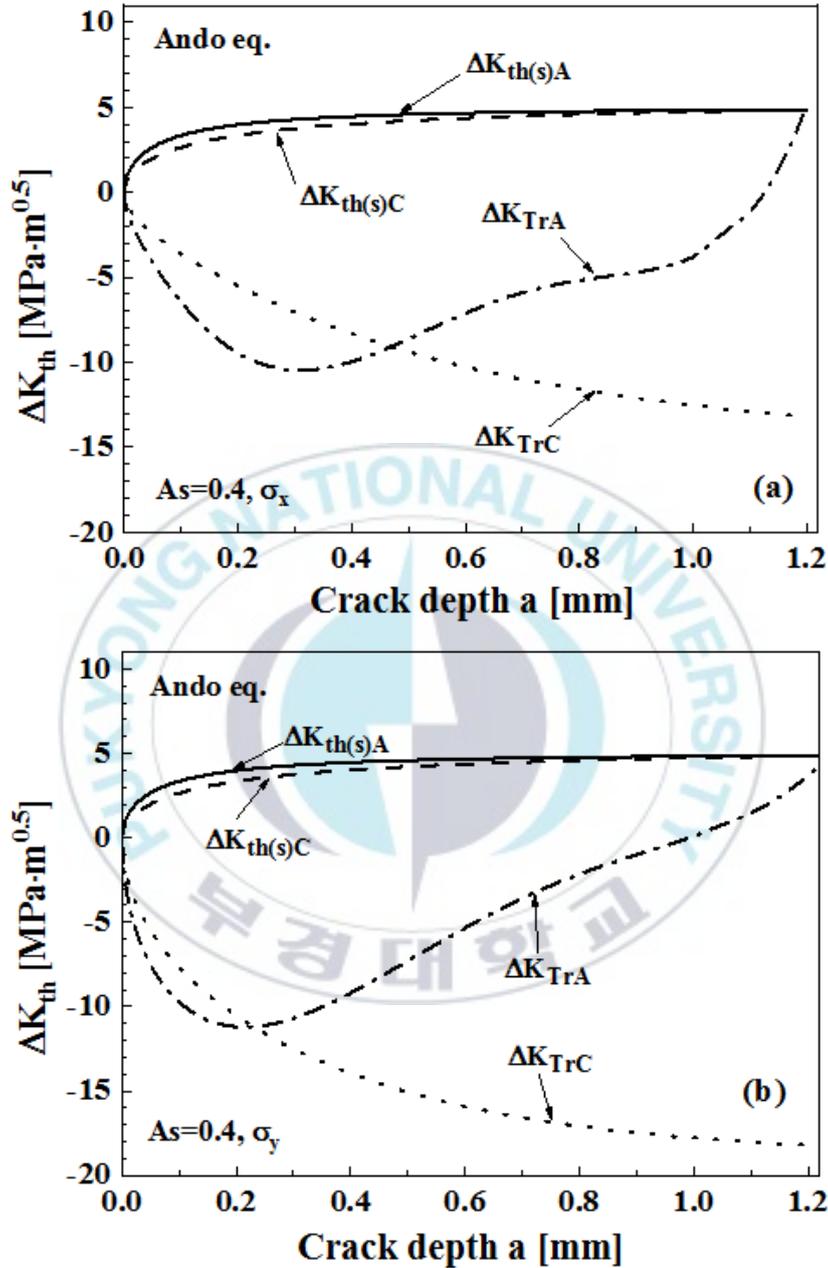


Fig. 11. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $A_s=0.4$  by Ando equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

Table 5. Harmless crack depth ( $a_{nlm}$ ) by Ando equation.

$As$	1.0	0.6	0.4
$\sigma_x$	1.147	1.186	1.197
$\sigma_y$	1.127	1.213	1.236



Fig. 12-14는  $As=1.0$ ,  $0.6$  및  $0.4$ 의 경우, 레이저 피닝(LP)한 용접재의  $K_{th(s)}$ 와 균열 깊이( $a$ )의 관계를 균열최심부(A점)와 균열표면부(C점)에 대하여 식(8)로 평가한 것이다. 잔류응력 영역을 진전하는 균열의 응력확대계수 $K_{Tr}$ 은 식(9)로 평가하였으며,  $K_{th(s)A}$  및  $K_{th(s)C}$ ,  $K_{TrA}$  및  $K_{TrC}$ 는 Figs. 7-9에 나타낸 것과 같다.  $K_{TrA}$ 와  $K_{th(s)A}$ 의 교차하였으나,  $K_{TrC}$ 와  $K_{th(s)C}$ 는 교차하지 않았다. Table 6은 Fig. 12-14에서  $K_{TrA}$ 와  $K_{th(s)A}$ 의 교차한 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )를 나타낸다. Fig. 12의  $As=1.0$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.147\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.128\text{mm}$ 이고, Fig. 13의  $As=0.6$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.186\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.213\text{mm}$ 이다. Fig. 14의  $As=0.4$ 의 경우, (a)의  $a_{hlm}=1.197\text{mm}$ 이고, (b)의  $a_{hlm}=1.236\text{mm}$ 이다. 이들 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )는 식(1)에서 구한 것과 동일하였다. 따라서 식(1)과 식(8)을 사용하여 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )를 평가하여도 동일한 결과를 얻을 수 있다.

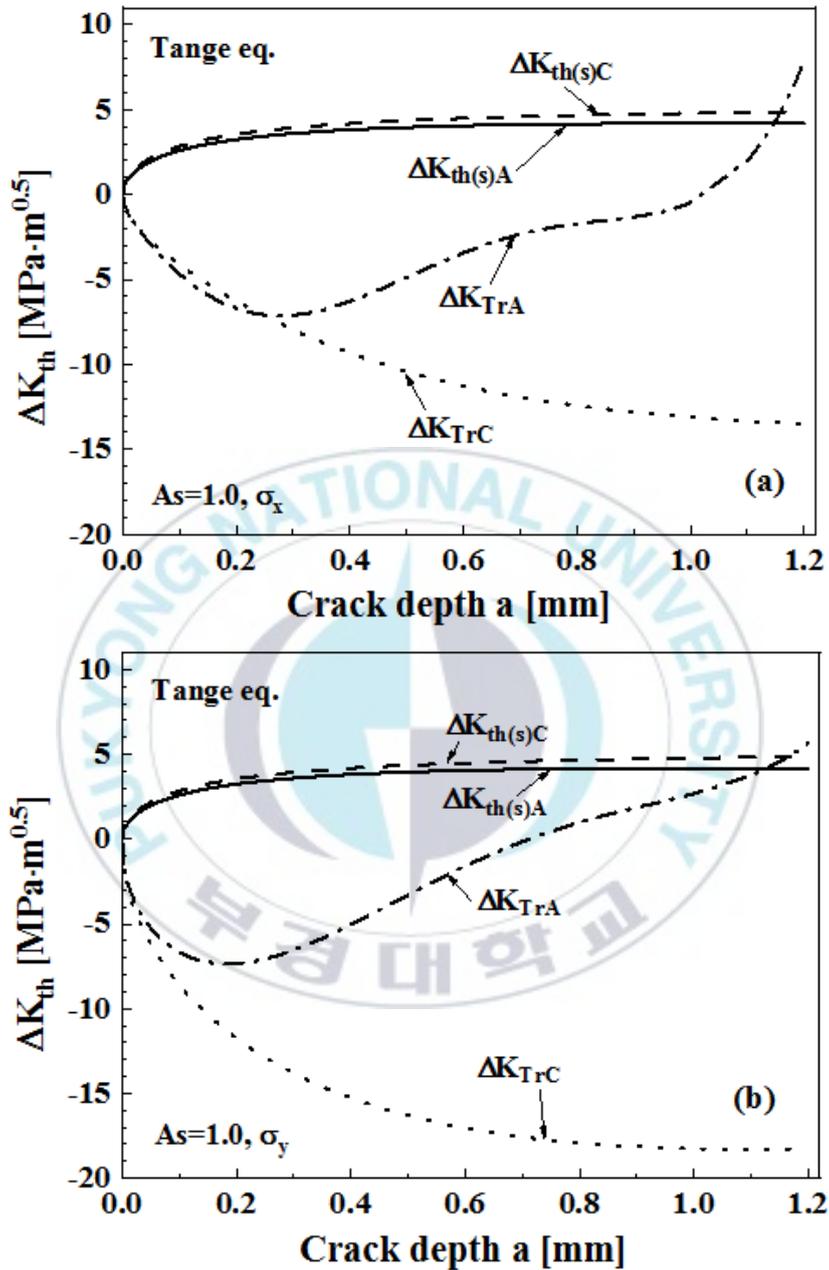


Fig. 12. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $As=1.0$  by Tange equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

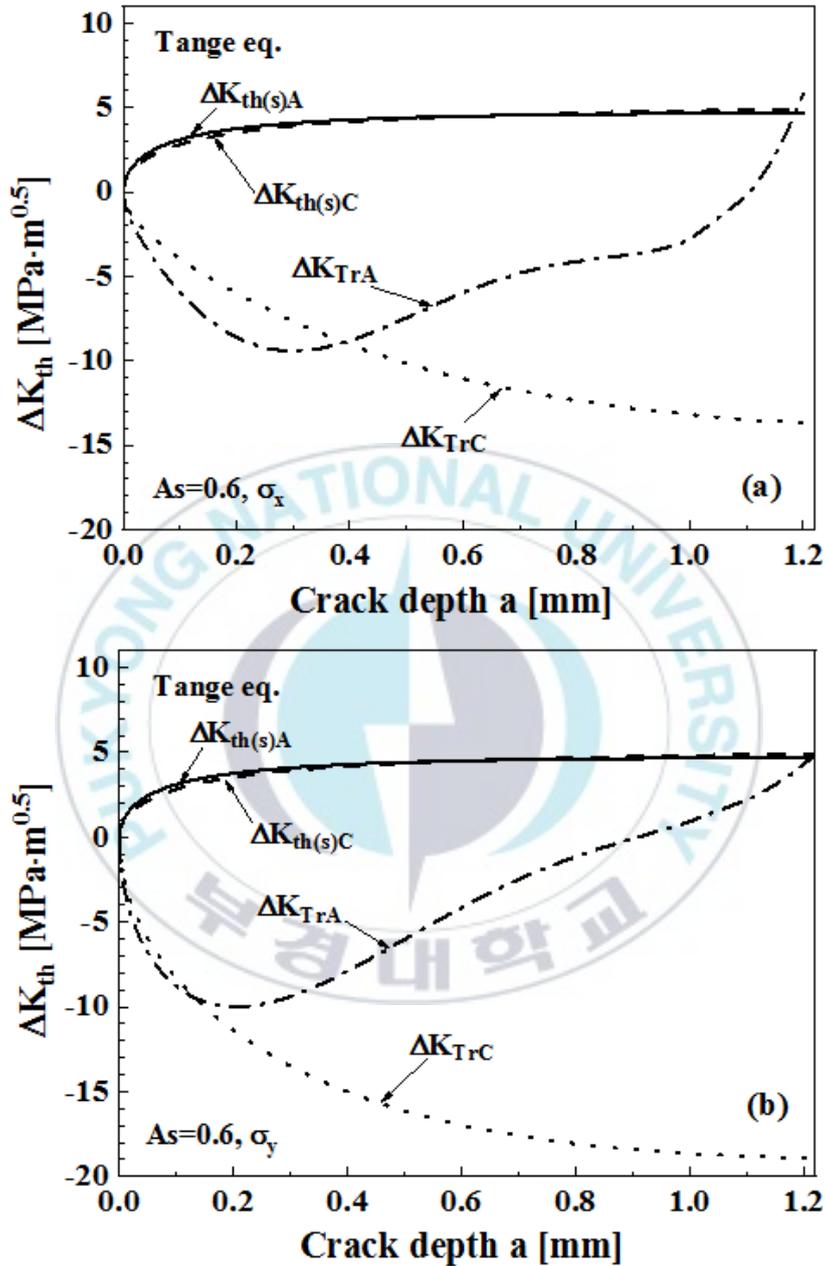


Fig. 13. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $As=0.6$  by Tange equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

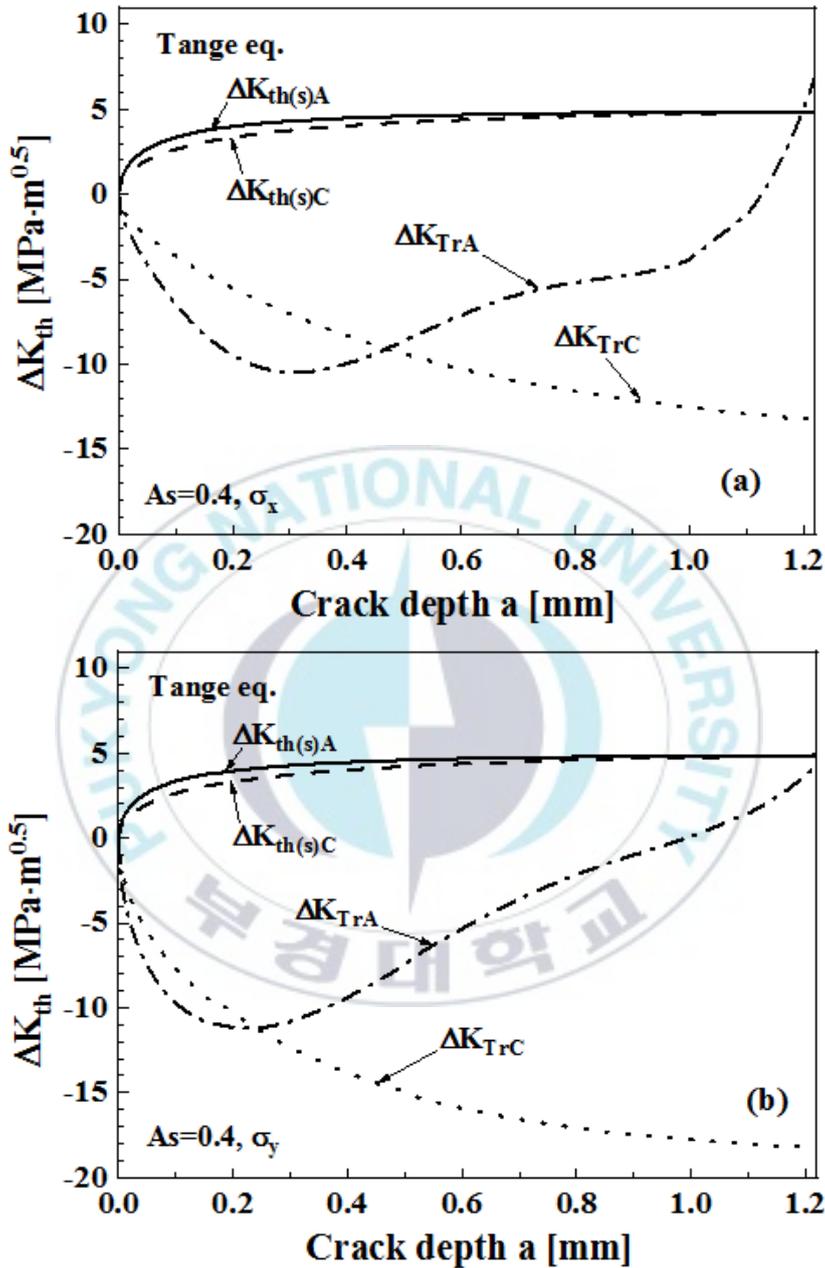


Fig. 14. Crack depth dependence of  $K_{th(s)}$  and  $K_{Tr}$  of A and C points in case of  $A_s=0.4$  by Tange equation. (a) Residual of  $\sigma_x$  direction, (b) Residual of  $\sigma_y$  direction.

Table 6. Harmless crack depth ( $a_{nlm}$ ) by Tange equation.

As	1.0	0.6	0.4
$\sigma_x$	1.147	1.186	1.197
$\sigma_y$	1.128	1.213	1.236



## 5. 결론

본 연구는 오스테나이트계 STS304 강의 미소 균열 길이에 따르는 하한계응력확대계수 및 피로한도를 구하고, 광섬유 전달 레이저로 피닝하여 무해화 가능 균열 깊이( $a_{hlm}$ )를 평가하였다.

- 1) Ando 식과 Tange 식에 의한 균열 깊이에 따르는 하한계응력확대계수는  $A_s$ 에 따라서 두 식에 의한 하한계응력확대계수의 차이는 없고, 거의 비슷하게 나타났다. 또한,  $A_s$ 가 작을수록 작은 균열에서 하한계응력확대계수가 급격하게 증가하였고, 균열이 증가함에 따라서 긴 균열의 하한계응력확대계수에 수렴하였다.
- 2) Ando 식과 Tange 식에서 얻은 표면균열 길이 및 균열 깊이의 피로한도는 균열 깊이에 대하여 비슷하게 감소하였다.  $A_s=1.0$ 은 표면균열 길이의 피로한도가 깊이의 것보다 빠르게 감소하였다. 그러나  $A_s=0.6$ 과  $0.4$ 의 피로한도는 균열 깊이의 피로한도가 표면균열의 것보다 약간 빠르게 감소하였다. 즉,  $A_s$ 가 작을수록 균열 깊이의 피로한도 감소가 빠르게 나타났다.
- 3) 무해화 가능 균열 크기( $a_{hlm}$ )는 Ando 식과 Tange 식으로 평가하여도 비슷하였다. 본 연구에 적용한 레이저 피닝에 의한 두 방향의 잔류응력을 사용한 무해화 가능 균열 크기( $a_{hlm}$ )는  $\sigma_x$  방향에서 약  $a=1.2\text{mm}$ ,  $\sigma_y$  방향에서  $a=1.25\text{mm}$ 이며, 표면균열은 길이에 상관없이 무해화 가능한 것으로 나타났다.

## References

- [1] Shot peening technical association, 1997, “The method and an effect of shot peening,” Nikkan Kogyo Shimbun Ltd., p. 13.
- [2] H. Okada, A. Tange, K. Ando, 2001, “Effect of shot peening on improvement of fatigue strength for metal bellows,” Transactions of Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2001, No. 46, pp. 27-31.
- [3] H. Mano, S. Kondo, T. Imura and A. Matsumura, 2005, “Effect of nanocrystalline surface layer produced by shot peening on fatigue strength,” J. Japan Inst. Metals, Vol. 69, No. 2, pp. 213-216.
- [4] F. Takahashi, A. Tange and K. Ando, 2008, “Effect of shot peening on fatigue limit of surface flawed samples,” Fatigue Fract Engng Mater Struct, Vol. 31, pp. 242-250.
- [5] K. Takahashi, T. Amono, K. Hananori, K. Ando, F. Takahashi, 2009, “Improvement of fatigue limit by shot peening for high strength steel specimens containing a crack-like surface defect,” J. Soc. Mater Science of Japan, Vol. 58, No. 12, pp. 1030-1036.
- [6] K. Matsui, M. Koshimune, K. Takahashi, K. Ando, 2010, “Influence of shot peening method on rotating bending

- fatigue limit for high strength steel,” Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2010, No. 55, pp. 7-12.
- [7] K. Takahashi, T. Hayashi, K. Ando, F. Takahashi, 2010, “Evaluation of acceptable defect size by shot peening based on fracture mechanics,” Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2010, No. 55, pp. 25-30.
- [8] K. Houjou, K. Takahashi, K. Ando, Y. Sekiguchi, 2013, “Improvement of fatigue limit and rendering crack harmless by peening for rolled steel containing a crack at the weld toe zone,” The Japan Society of Mechanical Engineers, Vol. 79, No. 797, pp. 110-114.
- [9] K. Houjou, K. Takahashi, K. Ando, R. Fueki, H. Okada, 2015, “Effect of material hardness on crack size rendered harmless by shot peening,” Journal of the Society of Materials Science, Japan, Vol. 64, No. 11, pp. 859-864.
- [10] S. Fukuda, T. Amano, K. Takahashi, K. Matsui, H. Ishigami, K. Ando, 2009, “Increase in fatigue limit and acceptable size of defect for smooth and notched specimen by cavitation peening,” Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2009, No. 54, pp. 1-6.
- [11] K.W. Nam, K. Ando, M.H. Kim, K. Takahashi, Improving reliability of high strength material designed against fatigue limit by applying surface crack nondamaging technology, “

Fatigue Fract Engng Mater Struct (Submitting)

- [12] Y. Sano, M. Kimura, K. Sato, M. Obata, A. Sudo, Y. Hamamoto, S. Shima, Y. Ichikawa, H. Yamazaki, M. Naruse, S. Hida, T. Watanabe and Y. Oono, 2000, "Development and application of laser peening system to prevent stress corrosion cracking of reactor core shroud," *Proc. of 8th Int. Conf. on Nuclear Engineering (ICONES)*, ICONE-8441, Baltimore, April 2000.
- [13] M. Shimamura, K. Sato, S. Okada, N. Mukai, Y. Sano Y. Ono, N. Suezono, S. Hida, M. Naruse, 2001, "Underwater robotic system for preventive maintenance of core shroud by laser peening," *Proc. of 9th Int. Topical Meeting on Robotics and Remote Systems*, Seattle, March 2001.
- [14] K. Micheal, R.M. Seetha, Q. Dong, K.V. Vijay, 2017, "Effect of laser shock peening on residual stress, microstructure and fatigue behavior of ATI 718Plus alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 102, pp. 121-134.
- [15] X.C. Zhang, Y.K. Zhang, J.Z. Lu, F.Z. Xuan, Z.D. Wang, S.T. Tu, 2010, "Improvement of fatigue life of Ti-6Al-4V alloy by laser shock peening," *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 527, No. 15, pp. 3411-3415.
- [16] Y. Sano, M. Kimura, M. Yoda, N. Mukai, K. Sato, T. Uehara, T. Ito, M. Shimamura, A. Sudo, N. Suezono, 2001,

“Development of fiber-delivered laser peening system to prevent stress corrosion cracking of reactor components,” International Conference on Nuclear Engineering (INIS-FR-647), Nice, France.

- [17] A. Ohta, N. Suzuki, Y. Maeda, 2003, “Shift of S-N curves with stress ratio” , Journal of International Institute of Welding, Vol. 47, pp. 19-24.
- [18] K. Hasegawa, S. Usami, 2017, “Effect of Stress ratio on fatigue crack growth threshold for austenitic stainless steels in air environment,” Key Engineering Materials, Vol. 741, pp. 88-93.
- [19] K. Ando, R. Fueki, K. W. Nam, K. Matsui, K. Takahashi, 2019, “A study on the unification of the threshold stress intensity factor for micro crack growth,” Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2019, No. 64, pp. 39-44.
- [20] K. Ando, K. W. Nam, M. H. Kim, T. Ishii, K. Takahashi, 2020, “Analysis of peculiar fatigue fracture behavior of shot peened steels focusing on threshold stress intensity factor range,” Japan Society of Spring Engineers, Vol. 2020, No. 65, pp. 35-41.
- [21] K. Ando, K. W. Nam, M. H. Kim, K. Takahashi, 2020, “Improvement of reliability of fatigue properties of high strength steel applying surface crack non-damaging

- technology,” Journal of High Pressure Institute of Japan. Vol. 58, No. 5, pp. 11-19.
- [22] K. Ando, M. H. Kim, K. W. Nam, 2020, “Analysis on peculiar fatigue fracture behavior of shot peened metal using new threshold stress intensity factor range equation,” Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct., (in printing)
- [23] J. C. Newman Jr., I. S. Raju, 1981, “An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack,” Eng Fract Mech., Vol. 15, pp. 185-192.
- [24] A. Tange, T. Akutu, N. Takamura, 1991, “Relation between shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel,” Transactions of Japan Society for Spring Engineers, Vol. 1991, No. 36, pp. 47-53.
- [25] M. H. El Haddad, T. H. Topper, K. N. Smith, 1979, “Prediction of non-propagating cracks,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 573-584.
- [26] American Petroleum Institute. Recommended practice 579, Fitness for service. American Petroleum Institute. 2000: C3-C10.

## 발표 논문 목록

1. 손대진, 팽재은, 김민현, 박인덕, 남기우, 2020, “레이저 피닝한 STS304 용접부의 피로한도 평가”, 한국동력기계공학회 2020년도 추계학술대회논문집 pp. 4-6.

Dai-Jin Son, Jae-Eun Paeng, Min-Heon Kim, In-Duck Park and Ki-Woo Nam, 2020, “Fatigue Limit Evaluation of Laser-Peened STS304 Weld Part”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2020 Fall Annual Meeting, pp. 4-6.

2. 남기우, 팽재은, 구경희, 손대진, 2021, “레이저 피닝한 STS304의 특이한 피로 특성 평가”, 동력시스템공학회지 제\*\*권 제\*호 pp. -. (투고중)

Ki-Woo Nam, Jae-Eun Paeng, Kyoung-Hee Gu and Dai-Jin Son\*, 2021, “A Peculiar Fatigue Characteristics Evaluation of Laser-Peened STS304”, Journal of the Power System Engineering (투고중)

## 감사의 글

회사 업무와 학업의 병행이 쉽지 않았지만, 짧지 않은 2년간의 대학원 생활이 주마등처럼 떠오릅니다. 설레는 마음으로 배움의 기회를 얻을 수 있어 행복한 시간이었습니다.

저에게 있어 석사 과정의 길은 학문의 길보다 어찌면 더 큰 교훈을 얻었던 과정에 가깝지 않았나 싶습니다. 이제 비로소 석사 논문의 모든 과정을 마치고 논문의 마지막 마무리를 감사의 글로 남겨보려 합니다.

본 논문이 완성될 수 있도록 처음부터 마지막까지 연구의 방향을 잡아주신 남기우 교수님의 지도에 진심으로 깊은 감사의 말씀을 드립니다. 더불어 논문심사를 위해 귀중한 시간을 할애하여 많은 조언을 해주신 안병현 교수님, 김공영 박사님, 현재용 박사님께도 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

울산에서 부산까지 함께해준 이성구 형님, 석사 과정을 함께 하였던 대학원 동료들과 배려심 많은 연구실 조교님들께 감사한 마음을 전합니다. 2년 동안 함께 동고동락하며 많은 것을 배우고 느낄 수 있었습니다. 부족함이 많은 저였지만 이해해주고 성장할 수 있도록 도와줘서 감사합니다.

그리고 항상 저를 위해주고 지원을 아끼지 않았던 우리 가족 사랑스럽고 멋진 큰아들 인혁, 무엇이든 잘하는 둘째 진혁, 그리고 제 인생에서 둘도 없이 사랑스럽고 고마운 후원자이자 영원한 동반자인 아내 안현미에게 고마움과 사랑한다는 말을 전합니다.

끝으로 주위에서 저에게 물심양면으로 도움을 주신 분들에게 이 자리를 빌려 감사의 마음을 전하며, 진정한 고마움의 뜻을 가슴 깊이 새기면서 열정과 함께 진정한 행복을 추구하면서 열심히 살아가도록 하겠습니다.

2021년 6월

손 대 진