



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](#)

공 학 석 사 학 위 논 문

표면 상태를 고려한 표면균열재의
하한계응력확대계수 및 피로한도의
평가



2019년 8월

부경대학교 대학원

학연협동 기계공학과

이 원 구

공 학 석 사 학 위 논 문

표면 상태를 고려한 표면균열재의
하한계응력확대계수 및 피로한도의
평가

지도교수 남 기 우

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.

2019년 8월

부경대학교 대학원

학연협동 기계공학과

이 원 구

이원구의 공학석사 학위논문을 인준함.

2019년 8월



주 심 공학박사 김 태 일 (인)

위 원 공학박사 김 철 수 (인)

위 원 공학박사 남 기 우 (인)

목 차

Abstract

1. 서론	1
2. 유한판 중의 반타원 표면균열의 파괴역학적 관계	2
3. 평가방법 및 재료	6
4. 결과 및 고찰	12
4.1 균열재의 피로한도(σ_{wc}^R)와 균열치수와의 관계	12
4.2 균열재의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)와 균열치수와의 관계	27
5. 결론	40
참고문헌	42

The evaluation of threshold stress intensity factor and the fatigue limit of
surface-cracked specimen considering the surface condition

Weon-Gu Lee

UR Interdisciplinary Program of Mechanical Engineering, Graduate School,
Pukyong National University

Abstract

This study evaluated the threshold stress intensity factor and fatigue limit of surface cracking materials according to the variation of stress ratio and aspect ratio with reference to fatigue limit of gentle grind specimen, severe grind specimen and shot peened severe grind specimen. Surface cracks in the gentle grind specimen, severe grind specimen and shot peened severe grind specimen could evaluated the threshold stress intensity factor and the fatigue limit according to stress ratio and aspect ratio using the equivalent crack length. As the surface crack length increased, the fatigue limit decreased rapidly as a small stress ratio and a large aspect ratio. On the other hand, the depth of surface cracks decreased rapidly as a small stress ratio and aspect ratio. As the surface crack length increased, the threshold stress intensity factor rapidly increased at a small stress ratio and a large aspect ratio. On the other hand, the surface crack depth rapidly increased at a small stress ratio and aspect ratio. The reduction ratio of the fatigue limit at the surface crack length of the same stress ratio is more larger than 0.4 in aspect ratio 0.1. However, the surface crack depth is larger than 0.1 in aspect ratio of 0.4. On the other hand, in the surface crack length of the same stress ratio, the rate of increase of the threshold stress intensity factor is smaller than 1.0 in the aspect ratio 0.4, but the surface crack depth is larger than 1.0 in the aspect ratio 0.4. This is because, when the aspect ratio became large, crack propagates in the depth direction than the surface direction, and propagates at the same time when it becomes similar to the surface crack length.

1. 서론

피로 균열 성장률과 하한계응력확대계수를 결정하기 위한 대부분의 실험은 큰 균열 과 큰 관통균열을 대상으로 실시되었다. 그러나 실제 피로 파괴에서 매우 자주 발생하지만, 파괴는 매우 작은 균열에서 발생하고, 성장에 의하여 시작된다. 과학적 관점과 실용적인 측면에서 작은 균열의 중요성을 인식하게 되었고, 작은 균열은 큰 균열에서 얻어진 균열 성장 법칙을 따르지 않는다는 것을 알았다.[1] 표면 균열이 전파하지 않는 것은 0.5mm보다 큰 표면 균열 길이에 대하여 일정한 하한계응력확대계수와 관련이 있다고 하였다.[2] 이것보다 작은 균열에서는 하한계응력확대계수가 아닌 피로한도와 동일한 응력이 매우 작은 결함진전에 대한 한계 조건이었다. 미소 균열 문제는 소규모 비선형 영역의 가정이 성립하지 않는 문제이다. Haddad[3]는 균열길이에 미소한 균열 길이를 합하여, 하한계응력확대계수의 균열 길이 의존성에 관하여 타당한 평가식을 유도하였다. 또한 Tange 등[4]은 Haddad식에서 미소한 균열길이를 제거함으로서 보다 편리한 하한계응력확대계수 평가식을 유도하였으며, 이 식과 Newman-Raju식[5]을 사용하여 쇼트피닝한 용접부 등에 표면균열의 균열 무해화 연구를 수행하였다.[6-9] 또한 Ando 등[10]은 소성역의 치수를 고려한 하한계응력확대계수 평가식을 유도하여, 모든 균열재의 피로한도와 하한계응력확대계수를 평가 할 수 있도록 하였다.

본 연구는 가공 공정을 고려하여, 연삭시험편, 황삭시험편 및 황삭한 부분에 쇼트피닝한 평활시험편의 피로한도를 참고하여,[11] 응력비 및 균열종횡비의 변화에 따르는 표면균열재의 하한계응력확대계수 및 피로한도를 평가하였다.

2. 유한판 중의 반타원 표면균열의 파괴역학적 관계

유한판에 존재하는 반타원 표면균열의 피로한도와 하한계응력확대계수 평가 방법은 다음과 같다.

무한판에 균열길이 $2c$ 의 관통균열이 굽힘응력 σ_B 를 받을 때, K 는 식(1)로 주어진다.

$$K = \sigma_B \sqrt{\pi c} \quad \text{--- (1)}$$

한편, 유한판의 반타원표면균열 K 는 Newman-Raju식[5]으로 평가할 수 있다. Fig. 1과 같이 유한판에 표면균열길이 $2c$, 표면균열깊이 a 의 반타원 표면균열이 균일한 굽힘응력 σ_B 를 받을 때의 K 는 식(2)이다.[10]

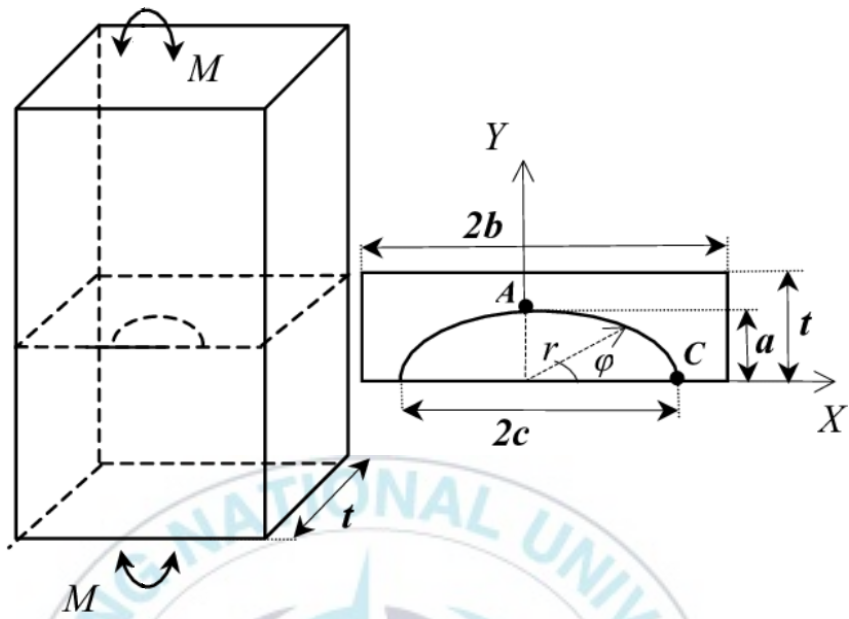


Fig. 1 Schematic illustration of a finite plate containing a semi-circular crack

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

여기서, F 및 Q 는 형상보정함수, H 는 굽힘응력에 관한 보정함수, t 는 유한판의 두께, b 는 유한판 폭의 절반, ϕ 는 반타원 표면균열의 선단의 각도이다. β 는 형상보정함수를 일괄하여 나타낸 형상보정계수이다. 동일 응력에서 동일 K 를 나타내는 무한판의 관통균열길이를 등가균열길이 c_e 로 하면, 식(1), (2)는 식(3)이 된다.

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

식(3)을 정리하면, c_e 와 a 의 관계는 식(4)로 나타낸다.

$$\sqrt{c_e} = \beta \sqrt{a} \quad \text{--- (4)}$$

따라서 유한판의 반타원 표면균열에 대한 ΔK_{th}^R 의 균열 치수 의존성은 식(1)의 c 에 식(4)의 c_e 를 대입함으로서, 식(5)로 평가할 수 있다.

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

여기서 β 는 ϕ 의 함수이고, K 를 평가하는 균열선단의 각도에 의해서,

K 의 평가값이 변화한다. σ_w^R 은 평활재 피로한도, $\Delta K_{th(l)}^R$ 는 무한판에 매우 긴 관통균열 $2c_0$ 가 존재하는 경우의 하한계응력확대계수이다. 균열재의 피로한도(σ_{wc}^R)는 등가 균열길이 식(4)를 식(5)에 대입하여, 정리한 식(6)에서 구한다.[10]

$$c_e \left\{ \sec \left(\frac{\pi \Delta \sigma_{wc}^R}{2 \Delta \sigma_w^R} \right) - 1 \right\} = \frac{\pi}{8} \left(\frac{\Delta K_{th(l)}^R}{\Delta \sigma_w^R} \right)^2 \quad \text{--- (6)}$$

그러나 무한판에 균열 길이 $2c$ 의 관통 균열이 존재하는 경우의 하한계응력확대계수의 평가식은 식(7)과 같다.

$$\Delta K_{th(c)}^R = \Delta \sigma_{wc}^R \sqrt{\pi c} \quad \text{--- (7)}$$

이 때, 응력비(R) 변화에 따른 $\Delta K_{th(l)}^R$ 은 ASME 규격식(8)로 부터 구한다.

$$\Delta K_{th(l)}^R = \Delta K_{th(l)}^o \sqrt{(1-R)} \quad \text{--- (8)}$$

식(7)에 식(4)를 대입하면, 반타원 표면균열의 하한계응력확대계수를 구할 수 있다. 식(7)을 반타원 균열에 대하여 적용하면, ΔK_{th} 를 결정하는 것은 K 의 최대값이다. 식(2)에서 K 가 최대로 되는 것은 β 가 최대로 될 때이므로, 식(5)는 β 의 최대값을 대입하면 된다.

3. 평가방법 및 재료

제조 공정은 부품의 피로 특성에 중요한 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 이러한 효과는 Table 1과 같이 유해하거나 유익하다.

Table 1 Factors affecting the fatigue characteristics of parts

Detrimental	Beneficial
Hardening	Carburizing
Grinding	Honing
Machining	Polishing
Plating	Burnishing
Welding	Rolling
EDM and ECM	Shot peening

해로운 측면에서 연삭, 기계 가공 및 용접은 인장 축 표면에 금속 피로 균열의 원인을 제공할 수 있다. 경화, 도금 및 방전 가공은 단단한 취성 표면을 남길 수 있다. ECM은 표면 입자 경계를 손상시키거나 약화시킬 수 있다. 유익한 측면에서 열거된 모든 공정은 압축잔류응력을 유도함으로써 피로 수명을 향상시킨다. 쇼트피닝(shot peening)은 다양한 재료 및 부품에 최고의 압축잔류응력을 부여하기 때문에 가장 많이 사용된다.

Fig. 2는 다양한 유형의 가공에 대한 S-N 곡선을 나타낸다. 기준이 되는 곡선은 연삭시험편의 경우이며, 414 MPa의 피로한도를 나타내었다. 다음 황삭시험편은 더욱 빠른 절단 속도 및 더 큰 절단을 취한 상태를

나타낸다. 이 경우 피로에 의하여 피로 강도를 저하시키는 큰 표면 인장잔류응력이 발생한다. 그림에서 알 수 있듯이 황삭시험편의 피로한도는 338 MPa로 기준 피로한도 연삭시험편보다 약 18% 감소하였다. 마지막은 쇼트피닝 황삭시험편의 피로한도를 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 이 시험편은 614 MPa의 피로한도를 나타내었다. 이것은 기준 피로한도 연삭시험편보다 약 48% 증가하였다. 이러한 피로한도의 증가는 황삭에 의하여 발생된 인장잔류응력이 쇼트피닝에 의하여 압축잔류응력으로 변화되었기 때문이다.[7, 12-14]



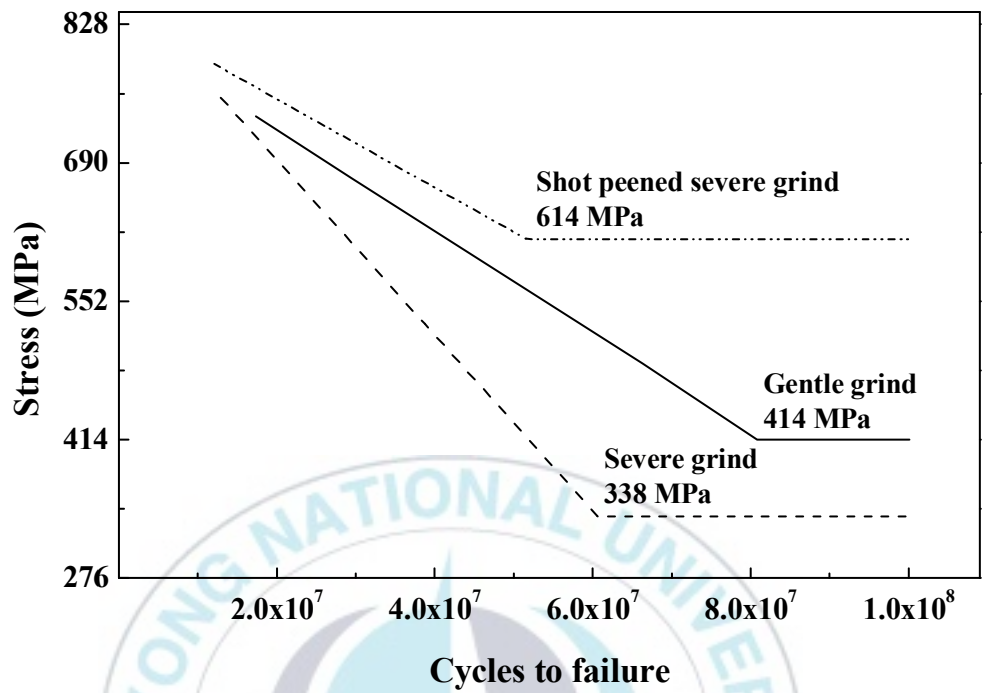


Fig. 2 S-N curves for various types of processing

Fig. 3은 해양구조물용 DNV F690강의 항복강도(σ_y)에서 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}^0$)를 결정하기 위한 그림이다.[15] 이것은 각종 금속재료에서 얻어진 σ_y 와 $\Delta K_{th(l)}^0$ 의 관계이다. 이 그림에서 DNV F690강의 σ_y 는 850.32 MPa이므로, ($\Delta K_{th(l)}^0$)는 약 $5.75 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 이다.



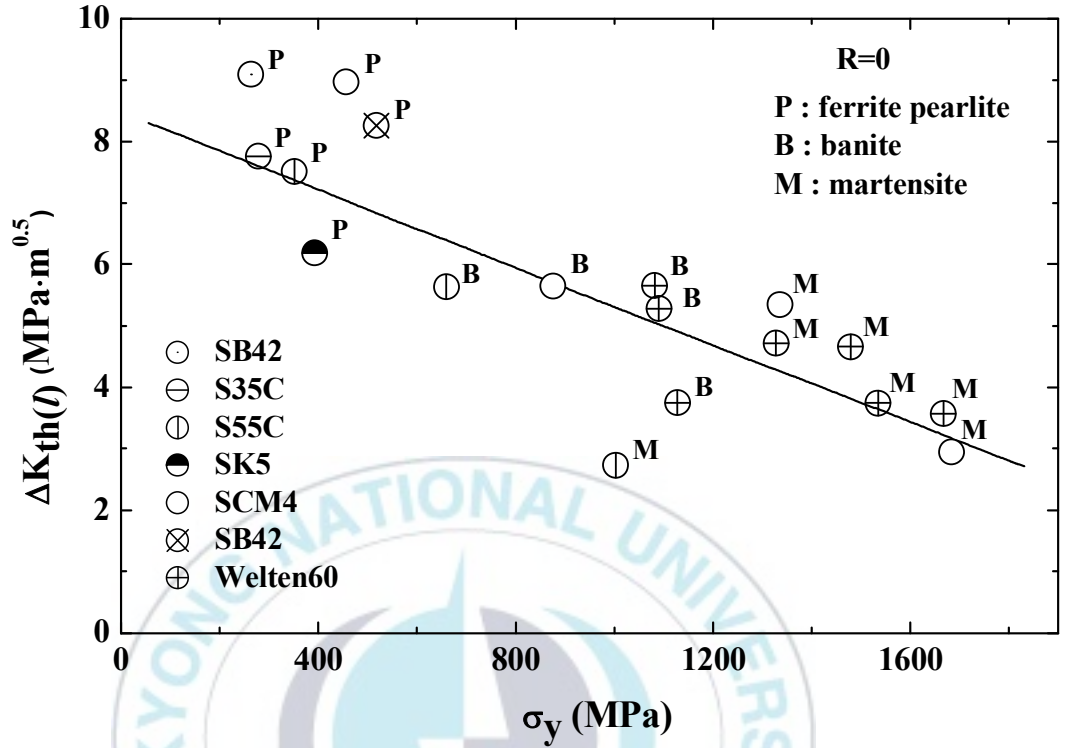


Fig. 3 Relationship between yield strength and threshold stress intensity factor

시험편은 판폭 50 mm, 두께 10 mm로 하였다. 균열 형상은 표면균열을 고려하였으며, 균열종횡비(aspect ratio : As)는 1.0과 0.4의 2종류로 하였다. 피로 하중의 응력비(stress ratio : R)는 0, 0.4, 0.8의 3종류로 하였으며, 굽힘 하중으로 하였다. 각각 피로한도(σ_w^0)는 위에서 결정한 연삭시험편 414 MPa, 황삭시험편 338 MPa, 쇼트피닝 황삭시험편 614 MPa의 3종류로 하였다.

표면 균열재의 피로한도($\sigma_{w(c,a)}^R$)는 식(6)에서 구하고, 이것을 식(7)에 대입하여, $\Delta K_{th(c,a)}^R$ 을 구한다. 이때 응력비에 따르는 응력은 최대응력 일정으로 하였다. Table 2는 평가에 사용한 조건을 나타낸다.

Table 2 Conditions used in the evaluation

Stress ratio (R)	$\Delta K_{th(l)}^R$ (MPa $\sqrt{m}$)	Aspect ratio (As)	σ_w^0 (MPa)
0	5.75	1.0 0.4	Gentle grind 414
0.4	4.45		Severe grind 338
0.8	2.57		Severe grind + shot peen 614

4. 결과 및 고찰

4.1 균열재의 피로한도(σ_{wc}^R)와 균열치수와의 관계

Fig. 4, 5 및 6은 각각 연삭시험편, 황삭시험편, 쇼트피닝 황삭시험편에서 얻어진 균열재의 피로한도($\sigma_{w(c,a)}^R$)를 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 표면균열길이 'c', (b)는 균열깊이 'a'에 따르는 균열재의 피로한도의 변화를 나타낸다. 이것은 식(6)을 사용하여 구한 것이다.

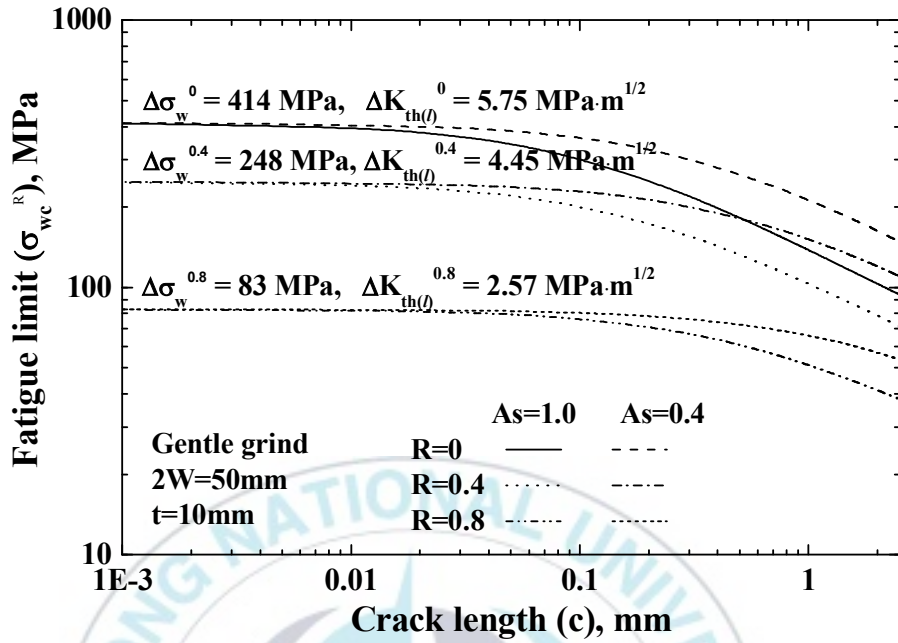
연삭시험편의 평활재 피로한도(σ_{w0}^R)는 응력비 0, 0.4, 및 0.8에서 각각 414 MPa, 248 MPa 및 83 MPa이다. 황삭시험편의 평활재 피로한도(σ_{w0}^R)는 응력비 0, 0.4, 및 0.8에서 각각 338 MPa, 203 MPa 및 68 MPa이다. 쇼트피닝 황삭시험편의 평활재 피로한도(σ_{w0}^R)는 응력비 0, 0.4, 및 0.8에서 각각 614 MPa, 368 MPa 및 123 MPa이다. 이 때 무한판에 매우 긴 관통균열이 존재하는 경우의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}^R$)는 각각 5.75 MPa, 4.45 MPa 및 2.57 MPa이다.

Fig. 4(a)는 연삭시험편의 피로한도(σ_{wc}^R)와 표면균열길이 'c'의 관계이다. 응력비 R=0인 경우, 균열재의 피로한도는 균열중형비(As)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 감소하고 있으나, 균열중형비(As) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 감소하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷한 경향으로 감소하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 감소하였다.

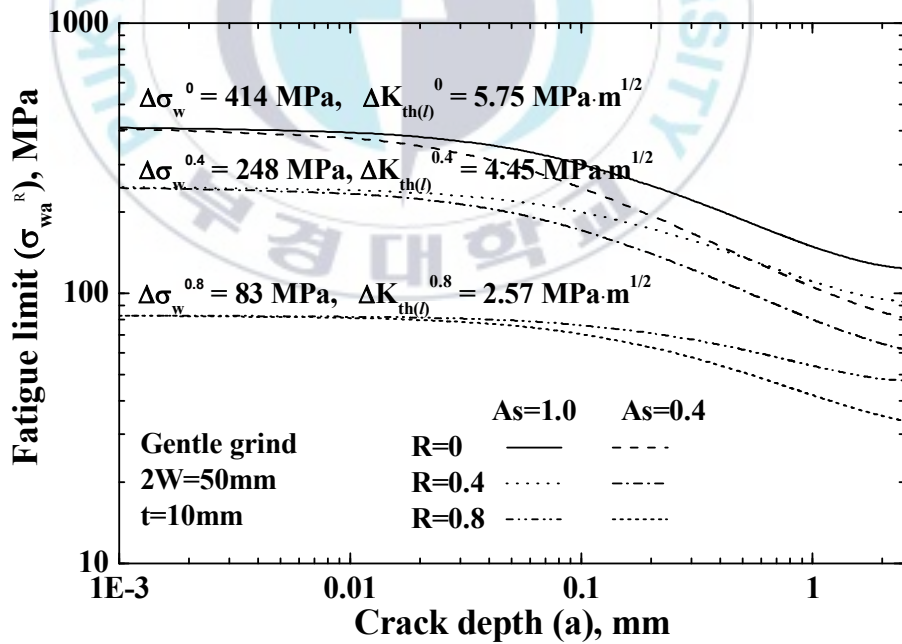
Fig. 4(b)는 연삭시험편의 피로한도(σ_{wa}^R)와 표면균열깊이 'a'의 관계

이다. 응력비 $R=0$ 인 경우, 균열재의 피로한도는 표면균열길이와 같이 균열깊이가 증가할수록 감소하고 있으며, 균열중형비(A_s)는 반대로 0.4가 1.0보다 급격하게 감소하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 감소하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 감소하였다.





(a)

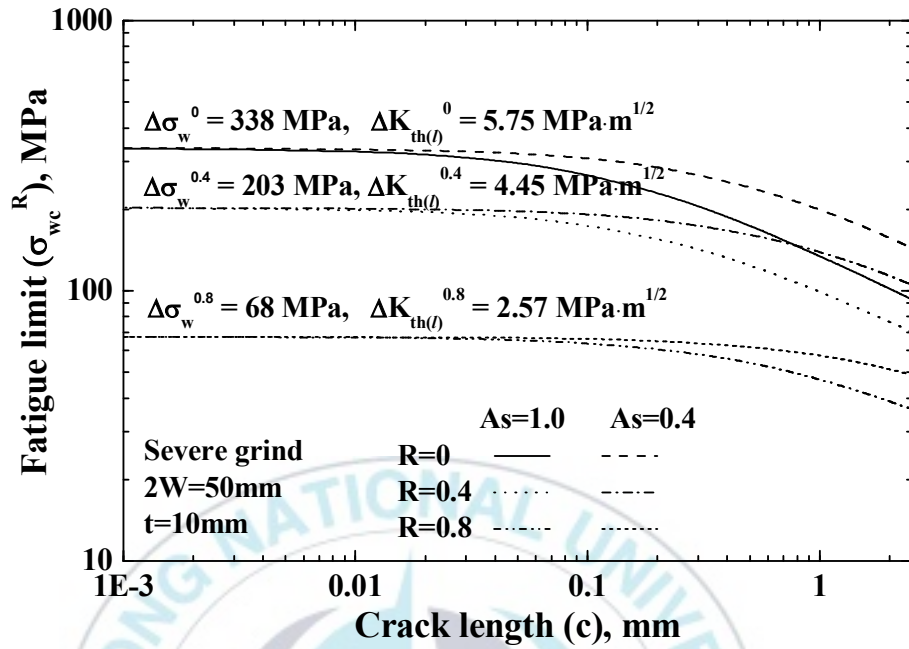


(b)

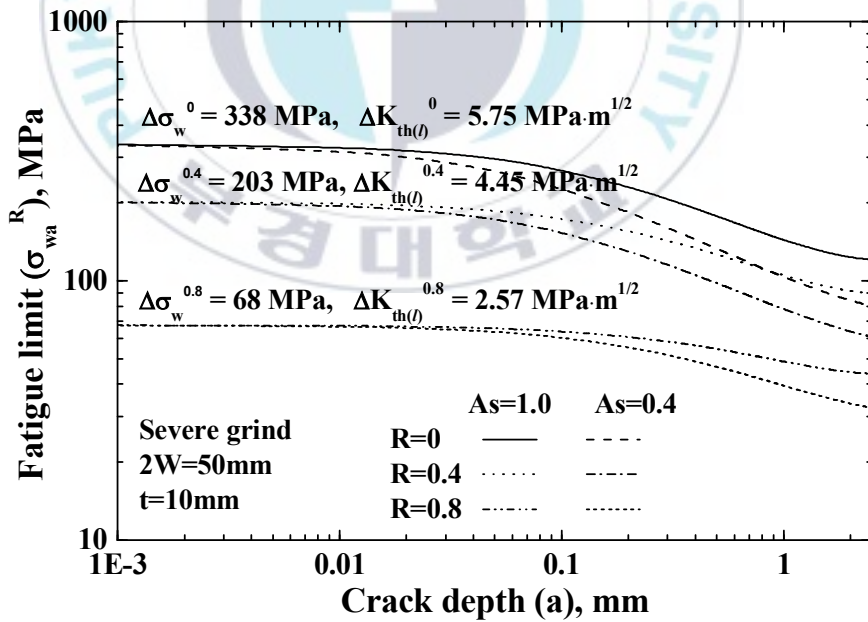
Fig. 4 Fatigue limit according crack length and crack depth on gentle grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth

Fig. 5(a)는 황삭시험편의 피로한도(σ_{wc}^R)와 표면균열길이 'c'와의 관계이다. 응력비 $R=0$ 인 경우, 균열재의 피로한도는 균열중형비(A_s)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 감소하고 있으나, 균열중형비(A_s) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 감소하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷한 경향으로 감소하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 감소하였다.

Fig. 5(b)는 황삭시험편의 피로한도(σ_{wa}^R)와 표면균열깊이 'a'의 관계이다. 응력비 $R=0$ 인 경우, 균열재의 피로한도는 표면균열깊이와 같이 균열깊이가 증가할수록 감소하고 있으며, 균열중형비(A_s)는 반대로 0.4가 1.0보다 급격하게 감소하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 감소하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 감소하였다.



(a)



(b)

Fig. 5 Fatigue limit according crack length and crack depth on severe grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth

Fig. 6(a)는 쇼트피닝 황삭시험편의 피로한도(σ_{uc}^R)와 표면균열길이 'c'와의 관계이다. 응력비 R=0인 경우, 균열재의 피로한도는 균열종횡비(As)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 감소하고 있으나, 균열종횡비(As) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 감소하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷한 경향으로 감소하였다.

Fig. 6(b)는 쇼트피닝 황삭시험편의 피로한도(σ_{ua}^R)와 표면균열길이 'a'의 관계이다. 응력비 R=0인 경우, 균열재의 피로한도는 표면균열길이와 같이 균열깊이가 증가할수록 감소하고 있으며, 균열종횡비(As)는 반대로 0.4가 1.0보다 급격하게 감소하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷하게 감소하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 감소하였다.

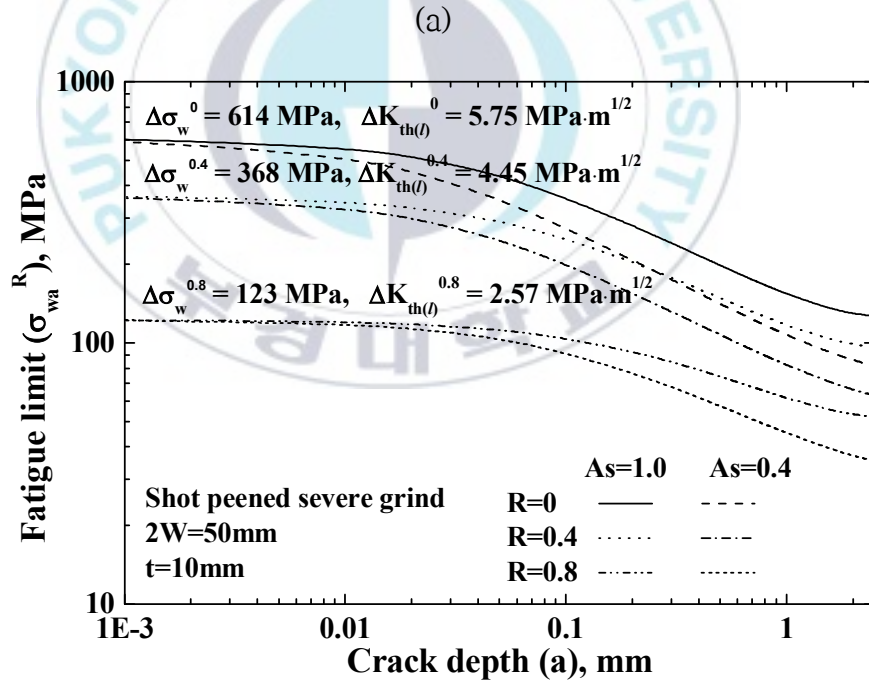
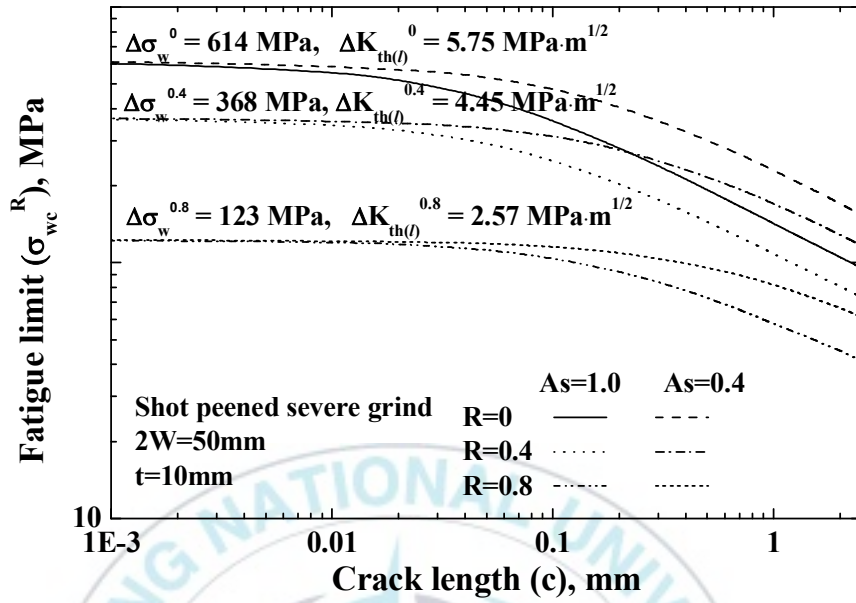


Fig. 6 Fatigue limit according crack length and crack depth on shot peened severe grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth

Table 3~5는 Fig. 5~6의 결과를 나타낸 것이다. 각각 연삭시험편, 황삭시험편 및 쇼트피닝 황삭시험편에서 표면균열깊이 및 표면균열깊이 0.1mm, 1mm, 2mm에서 피로한도 감소율($\sigma_{w(c,a)}^R/\sigma_w^0$)을 나타낸다.



Table 3 Fatigue limit reduction rate of gentle grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	27	12	19	8	8	3	27	40	19	31	8	15
1.0 mm	67	49	58	39	38	20	64	75	56	68	35	50
2.0 mm	75	61	68	52	50	31	70	80	62	74	42	58

Table 4 Fatigue limit reduction rate of severe grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	20	9	14	6	6	3	21	33	14	24	6	11
1.0 mm	60	41	51	32	31	15	58	69	48	62	28	42
2.0 mm	70	54	63	44	43	25	64	75	55	69	35	51

Table 5 Fatigue limit reduction rate of shot peened severe grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	41	22	32	15	15	7	42	55	32	46	15	26
1.0 mm	77	63	71	54	53	33	75	83	68	78	50	63
2.0 mm	83	72	78	65	63	46	79	86	73	82	57	70

Fig. 7은 Table 3~5에 나타난 연삭시험편, 황삭시험편 및 쇼트피닝 황삭시험편의 피로한도 감소율($\sigma_{w(c,a)}^R/\sigma_{w0}^R$)과 균열길이의 관계를 나타낸다.

Fig. 7(a)는 연삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 1mm, 2mm에서 피로한도 감소율($\sigma_{w(c,a)}^R/\sigma_{w0}^R$)을 나타낸다. 먼저 표면균열길이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(c)}^R/\sigma_{w0}^R$)를 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 피로한도는 표면균열길이 0.1mm에서 약 27%(As=1.0) 및 12%(As=0.4), 1mm에서 약 67%(As=1.0) 및 49%(As=0.4), 2mm에서 약 75%(As=1.0) 및 61%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.4인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 19%(As=1.0) 및 8%(As=0.4), 1mm에서 약 58%(As=1.0) 및 39%(As=0.4), 2mm에서 약 68%(As=1.0) 및 52%(As=0.4) 정도 감소하였다. 그리고 응력비 R=0.8인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 8%(As=1.0) 및 3%(As=0.4), 1mm에서 약 38%(As=1.0) 및 20%(As=0.4), 2mm에서 약 50%(As=1.0) 및 31%(As=0.4) 정도 감소하여, R=0 및 0.4보다 감소폭이 작았다. 다음에 표면균열깊이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(a)}^R/\sigma_{w0}^R$)를 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 피로한도는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 27%(As=1.0) 및 40%(As=0.4), 1mm에서 약 64%(As=1.0) 및 75%(As=0.4), 2mm에서 약 70%(As=1.0) 및 80%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.4인 경우는 표면균열깊이 0.1mm에서 피로한도는 약 19%(As=1.0) 및 31%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 56%(As=1.0) 및 68%(As=0.4), 2mm에서 약 62%(As=1.0) 및 74%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.8인 경우는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 8%(As=1.0) 및 15%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 35%(As=1.0) 및 50%(As=0.4), 2mm에서 약 42%(As=1.0) 및 58%(As=0.4) 정도 감소하였다.

Fig. 7(b)는 황삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 1mm, 2mm에서 피로한도 감소율($\sigma_{w(c,a)}^R/\sigma_{u0}^R$)을 나타낸다. 먼저 표면균열길이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(c)}^R/\sigma_{u0}^R$)를 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 피로한도는 표면균열길이 0.1mm에서 약 20%(As=1.0) 및 9%(As=0.4), 1mm에서 약 60%(As=1.0) 및 41%(As=0.4), 2mm에서 약 70%(As=1.0) 및 54%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.4인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 14%(As=1.0) 및 6%(As=0.4), 1mm에서 약 51%(As=1.0) 및 32%(As=0.4), 2mm에서 약 63%(As=1.0) 및 44%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.8인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 6%(As=1.0) 및 3%(As=0.4), 1mm에서 약 31%(As=1.0) 및 15%(As=0.4), 2mm에서 약 43%(As=1.0) 및 25%(As=0.4) 정도 감소하여, R=0 및 0.4보다 감소폭이 작았다. 다음에 표면균열깊이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(a)}^R/\sigma_{u0}^R$)를 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 피로한도는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 21%(As=1.0) 및 33%(As=0.4), 1mm에서 약 58%(As=1.0) 및 69%(As=0.4), 2mm에서 약 64%(As=1.0) 및 75%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.4인 경우는 표면균열깊이 0.1mm에서 피로한도는 약 14%(As=1.0) 및 24%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 48%(As=1.0) 및 62%(As=0.4), 2mm에서 약 55%(As=1.0) 및 69%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 R=0.8인 경우의 피로한도는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 6%(As=1.0) 및 11%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 28%(As=1.0) 및 42%(As=0.4), 2mm에서 약 35%(As=1.0) 및 51%(As=0.4) 정도 감소하였다.

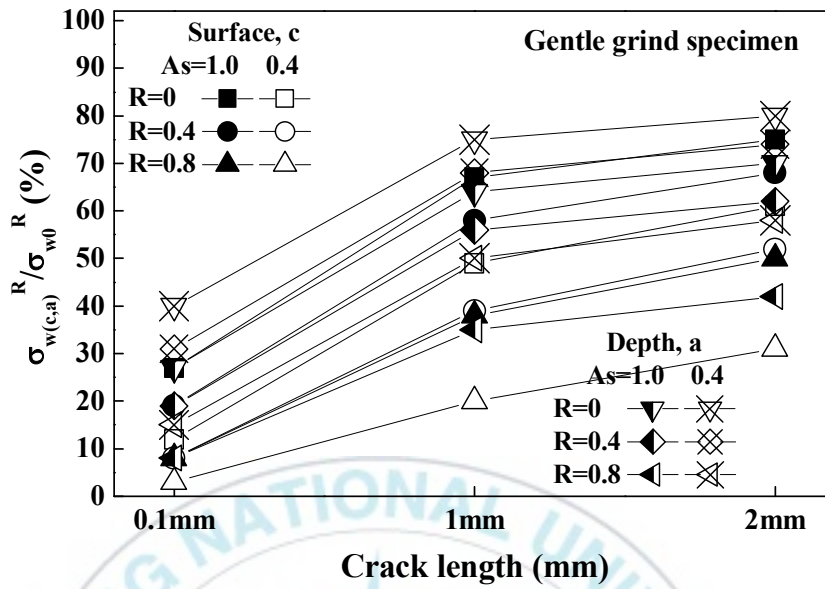
Fig. 7(c)는 쇼트피닝 황삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 1mm, 2mm에서 피로한도 감소율($\sigma_{w(c,a)}^R/\sigma_{u0}^R$)을 나타낸다. 먼저

표면균열길이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(c)}^R/\sigma_{w0}^R$)를 살펴보자. 응력비 $R=0$ 인 경우의 피로한도는 표면균열길이 0.1mm에서 약 41%(As=1.0) 및 22%(As=0.4), 1 mm에서 약 77%(As=1.0) 및 63%(As=0.4), 2 mm에서 약 83%(As=1.0) 및 72%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 32%(As=1.0) 및 15%(As=0.4), 1 mm에서 약 71%(As=1.0) 및 54%(As=0.4), 2 mm에서 약 78%(As=1.0) 및 65%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 표면균열길이 0.1mm에서 약 15%(As=1.0) 및 7%(As=0.4), 1mm에서 약 53%(As=1.0) 및 3%(As=0.4), 2 mm에서 약 63%(As=1.0) 및 46%(As=0.4) 정도 감소하여, $R=0$ 및 0.4보다 감소폭이 작았다. 다음에 표면균열깊이의 피로한도 감소율($\sigma_{w(a)}^R/\sigma_{w0}^R$)를 살펴보자. 응력비 $R=0$ 인 경우의 피로한도는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 42%(As=1.0) 및 55%(As=0.4), 1mm에서 약 75%(As=1.0) 및 83%(As=0.4), 2mm에서 약 79%(As=1.0) 및 86%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우는 표면균열깊이 0.1mm에서 피로한도는 약 32%(As=1.0) 및 46%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 68%(As=1.0) 및 78%(As=0.4), 2mm에서 약 73%(As=1.0) 및 82%(As=0.4) 정도 감소하였다. 응력비 $R=0.8$ 인 경우의 피로한도는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 15%(As=1.0) 및 26%(As=0.4), 1mm에서 피로한도는 약 50%(As=1.0) 및 63%(As=0.4), 2mm에서 약 57%(As=1.0) 및 70%(As=0.4) 정도 감소하였다.

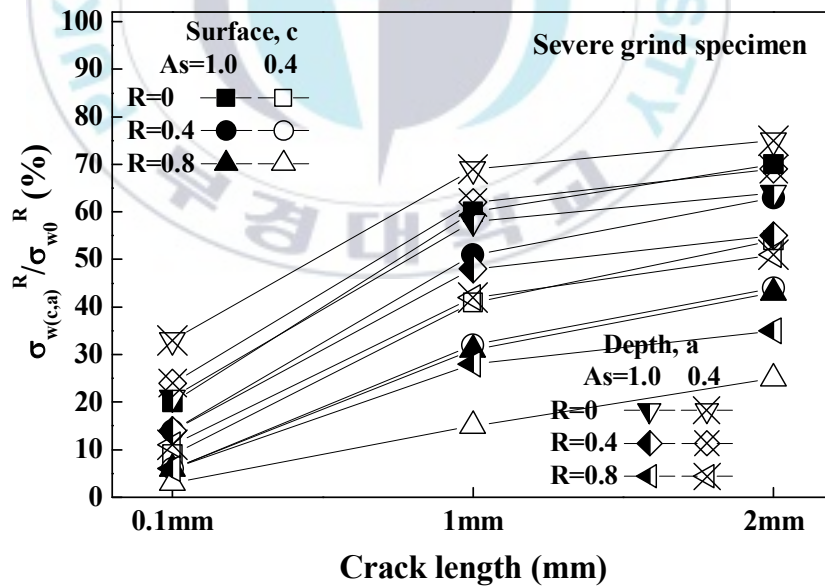
이상에서 표면균열길이가 증가함에 따라서 피로한도는 응력비 R 은 작고, 균열종횡비 As 는 큰 것이 빠르게 감소하였다. 반면, 표면균열깊이가 증가함에 따라서 피로한도는 응력비 R 은 작고, 균열종횡비 As 는 작은 것이 빠르게 감소하였다. 즉, 표면균열길이 및 표면균열깊이는 동일 균열 길이에서 응력비가 클수록 균열종횡비에 관계없이 감소율이 작아지고

있다. 그러나 동일 동일 응력비의 표면균열길이에서 피로한도의 감소율은 균열중횡비 0.4가 1.0보다 작으나, 표면균열깊이는 균열중횡비 0.4가 1.0보다 크다. 이것은 균열중횡비가 크게 되면, 균열은 표면보다 깊이 방향으로 먼저 진전하고, 표면균열길이와 표면균열깊이가 비슷하게 되면 동시에 진전하는 특성 때문이라 판단된다.





(a)



(b)

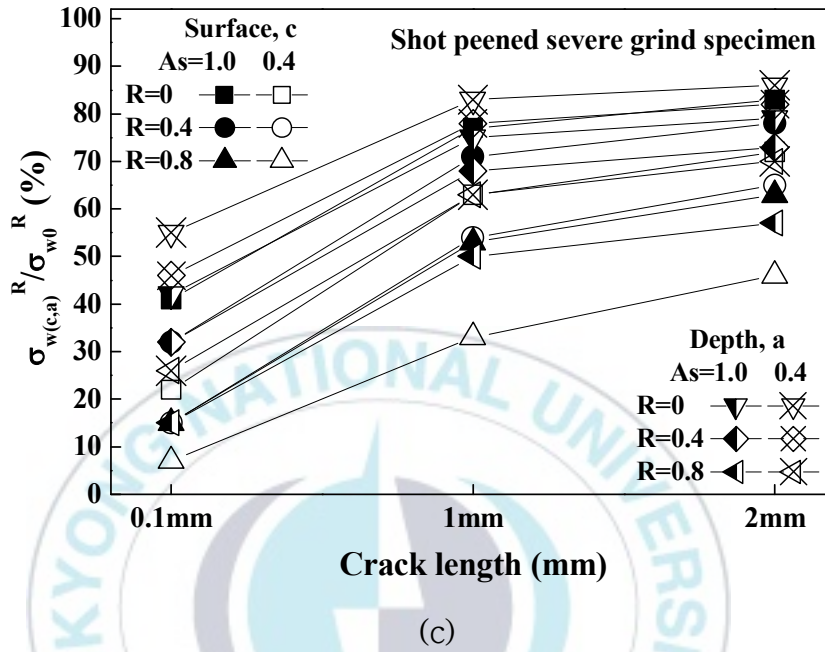


Fig. 7 Fatigue limit reduction rate on surface and depth crack length of 0.1 mm, 1 mm and 2 mm. (a) Gentle grind specimen, (b) Severe grind specimen, (c) Shot peened severe grind specimen

4.2 균열재의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)와 균열치수와의 관계

Fig. 8, 9 및 10은 각각 연삭시험편, 황삭시험편, 쇼트피닝 황삭시험편에서 얻어진 균열재의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)를 나타낸다. 각 그림에서 (a)는 표면균열길이 ‘c’, (b)는 균열깊이 ‘a’에 따르는 균열재의 하한계응력확대계수의 변화를 나타낸다. 이것은 식(7)을 사용하여 구한 것이다. 3종류 시험편의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(l)}^R$)는 응력비 0, 0.4, 및 0.8에서 각각 5.75 MPa, 4.45 MPa 및 2.57 MPa이다.

Fig. 8은 연삭시험편에서 표면균열길이 및 표면균열깊이에 따르는 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)를 나타낸다.

Fig. 8(a)는 연삭시험편의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c)}^R$)와 표면균열길이 ‘c’와의 관계이다. 응력비 $R=0$ 인 경우의 하한계응력확대계수는 균열중형비(A_s)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 증가하고 있으나, 균열중형비(A_s) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

Fig. 8(b)는 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(a)}^R$)와 표면균열깊이 ‘a’의 관계이다. 응력비 $R=0$ 인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열길 이와 같이 표면균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으며, 균열중형비(A_s)는 반대로 0.4가 1.0보다 더 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

Fig. 9은 황삭시험편에서 표면균열길이 및 표면균열깊이에 따르는 하

한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)를 나타낸다.

Fig. 9(a)는 황삭시험편의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c)}^R$)와 표면균열길이 ‘c’와의 관계이다. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 균열종횡비(As)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 증가하고 있으나, 균열종횡비(As) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 증가하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다, 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

Fig. 9(b)는 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(a)}^R$)와 표면균열깊이 ‘a’의 관계이다. 응력비 R=0인 경우, 균열재의 하한계응력확대계수는 표면균열길이와 같이 표면균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으며, 균열종횡비(As)는 반대로 0.4가 1.0보다 더 증가하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

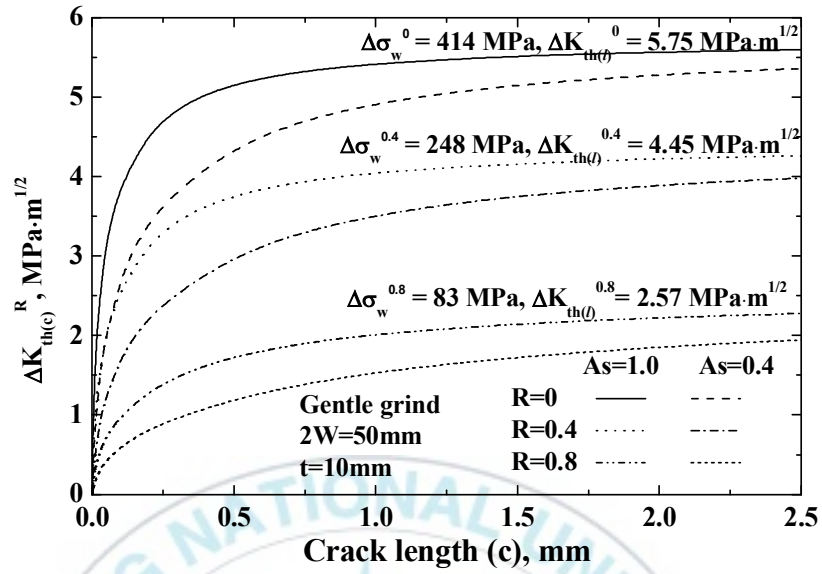
Fig. 10은 쇼트피닝 황삭시험편에서 표면균열길이 및 표면균열깊이에 따르는 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c,a)}^R$)를 나타낸다.

Fig. 10(a)는 쇼트피닝 황삭시험편의 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(c)}^R$)와 표면균열길이 ‘c’와의 관계이다. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 균열종횡비(As)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 증가하고 있으나, 균열종횡비(As) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 증가하고 있다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

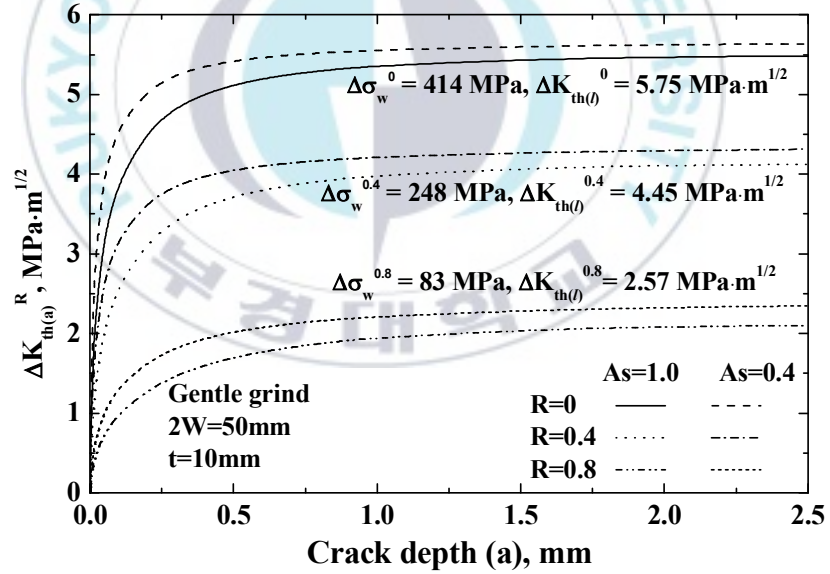
Fig. 10(b)는 하한계응력확대계수($\Delta K_{th(a)}^R$)와 표면균열깊이 ‘a’의 관계이다. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열길이와 같이

표면균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으며, 균열중횡비(A_s)는 반대로 0.4가 1.0보다 더 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.



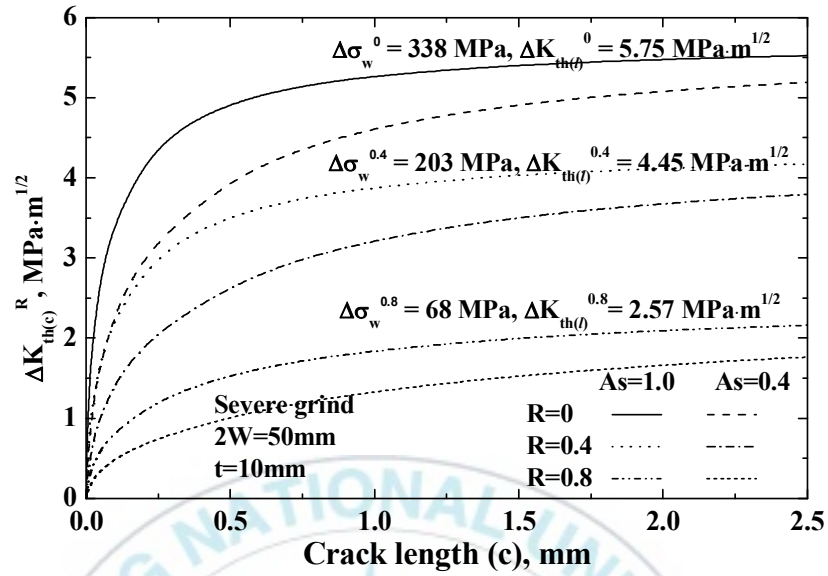


(a)

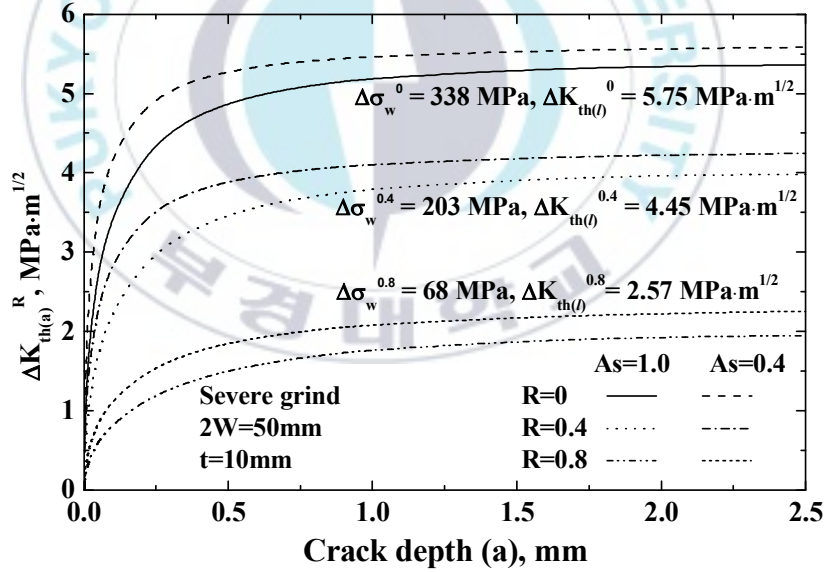


(b)

Fig. 8 Threshold stress intensity factor according crack length and crack depth on gentle grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth

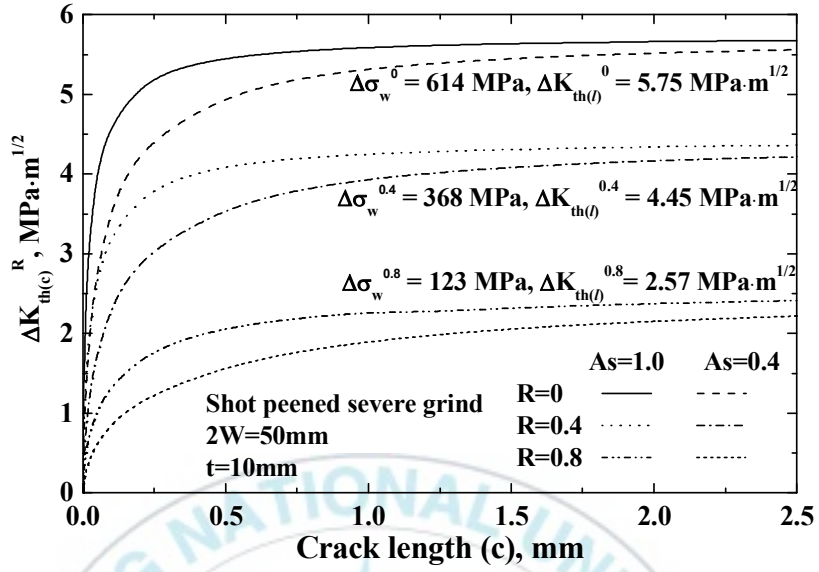


(a)

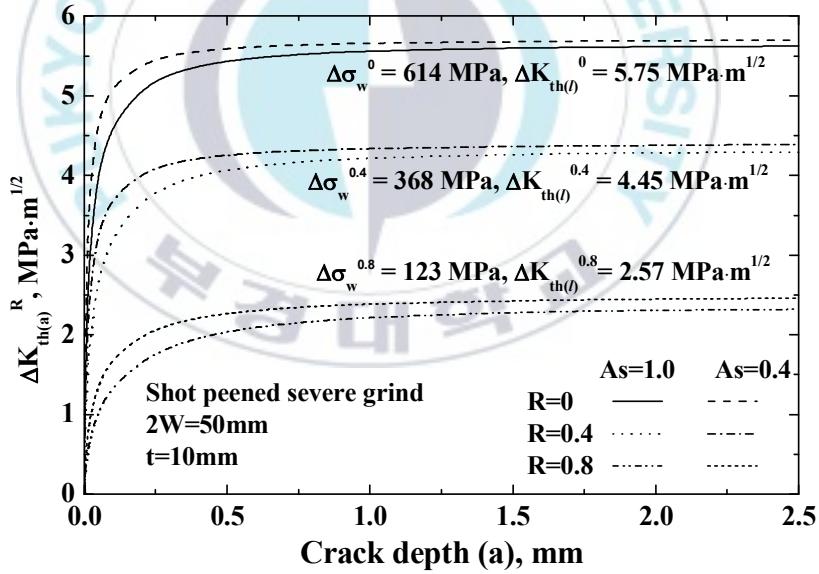


(b)

Fig. 9 Threshold stress intensity factor according crack length and crack depth on severe grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth



(a)



(b)

Fig. 10 Threshold stress intensity factor according crack length and crack depth on shot peened severe grind specimen. (a) Crack length, (b) Crack depth

Table 6~8는 Fig. 8~10의 결과를 나타낸 것이다. 각각 연삭시험편, 황삭시험편 및 쇼트피닝 황삭시험편에서 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 0.5mm, 1mm에서 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c,a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 나타낸다.



Table 6 Threshold stress intensity factor growth rate of gentle grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	68	47	58	38	38	23	68	80	58	72	38	51
0.5 mm	90	76	84	67	67	47	89	94	84	91	66	79
1.0 mm	94	86	91	79	78	60	93	97	89	95	76	86

Table 7 Threshold stress intensity factor growth rate of severe grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	60	40	50	32	32	19	60	74	23	65	32	44
0.5 mm	85	69	79	60	60	40	85	92	78	87	58	72
1.0 mm	92	80	87	72	72	52	90	95	85	92	69	81

Table 8 Threshold stress intensity factor growth rate of shot peened severe grind specimen (%)

crack length	surface						depth					
	R=0		R=0.4		R=0.8		R=0		R=0.4		R=0.8	
	As		As		As		As		As		As	
	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4	1.0	0.4
0.1 mm	81	62	73	52	52	33	81	89	73	84	52	66
0.5 mm	95	87	92	80	80	62	94	97	91	96	79	88
1.0 mm	97	93	96	89	88	74	97	98	95	98	86	93

Fig. 11은 Table 6~8에 나타난 연삭시험편, 황삭시험편 및 쇼트피닝 황삭시험편의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c,a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)과 균열길이의 관계를 나타낸다.

Fig. 11(a)는 연삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 0.5mm, 1mm에서 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c,a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 나타낸다. 먼저 표면균열길이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열길이 0.1mm에서 약 68%(As=1.0) 및 47%(As=0.4), 0.5 mm에서 약 90%(As=1.0) 및 76%(As=0.4), 1 mm에서 약 94%(As=1.0) 및 86%(As=0.4) 정도 증가하였다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 증가하였다. 다음에 표면균열깊이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열깊이 0.1mm에서 약 68%(As=1.0) 및 80%(As=0.4), 0.5mm에서 약 89%(As=1.0) 및 94%(As=0.4), 1mm에서 약 93%(As=1.0) 및 97%(As=0.4) 정도 증가하였다. 응력비 R=0.4인 경우도 R=0인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 R=0.8인 경우는 응력비 R=0 및 0.4보다 완만하게 증가하였다.

Fig. 11(b)는 황삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm, 0.5mm, 1mm에서 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c,a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 나타낸다. 먼저 표면균열길이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 R=0인 경우의 하한계응력확대계수는 균열종횡비(As)에 관계없이 표면균열길이가 증가할수록 증가하고 있으나, 균열종횡비

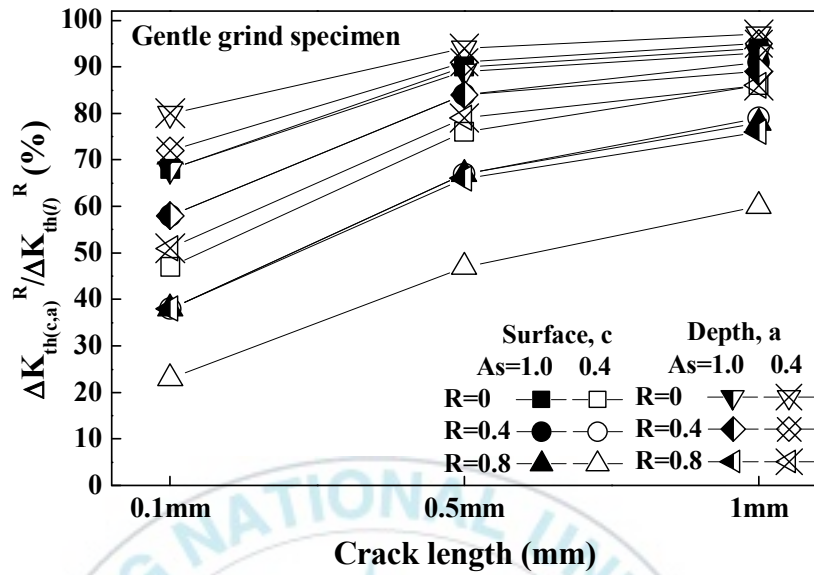
(As) 1.0이 0.4보다 더 급격하게 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4 보다 완만하게 증가하였다. 다음에 표면균열깊이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 $R=0$ 인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열깊이와 같이 균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으며, 균열종횡비(As)는 반대로 0.4 가 1.0 보다 더 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4 보다 완만하게 증가하였다.

Fig. 11(c)는 쇼트피닝 황삭시험편의 표면균열길이 및 표면균열깊이 0.1mm , 0.5mm , 1mm 에서 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c,a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 나타낸다. 먼저 표면균열깊이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(c)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 $R=0$ 인 경우의 하한계응력확대계수는 균열종횡비(As)에 관계없이 표면균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으나, 균열종횡비(As) 1.0 이 0.4 보다 더 급격하게 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷한 경향으로 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4 보다 완만하게 증가하였다. 다음에 표면균열길이의 하한계응력확대계수 증가율($\Delta K_{th(a)}^R / \Delta K_{th(l)}^R$)을 살펴보자. 응력비 $R=0$ 인 경우의 하한계응력확대계수는 표면균열깊이와 같이 균열깊이가 증가할수록 증가하고 있으며, 균열종횡비(As)는 반대로 0.4 가 1.0 보다 더 증가하고 있다. 응력비 $R=0.4$ 인 경우도 $R=0$ 인 경우와 비슷하게 증가하였다. 그러나 응력비 $R=0.8$ 인 경우는 응력비 $R=0$ 및 0.4 보다 완만하게 증가하였다.

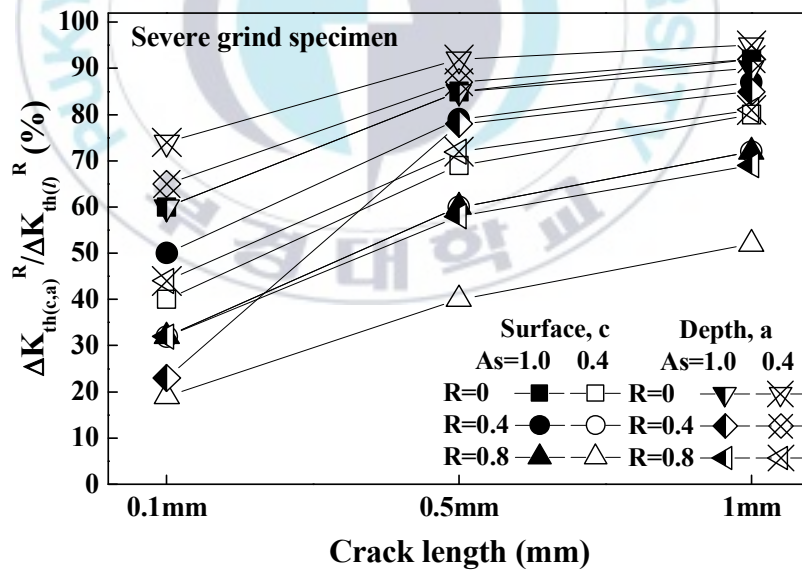
이상에서 하한계응력확대계수는 표면균열깊이가 증가함에 따라서 응

력비R은 작고, 균열중횡비As는 큰 것이 빠르게 증가하였다. 반면, 표면 균열깊이가 증가함에 따라서 하한계응력확대계수는 응력비R은 작고, 균열중횡비As는 작은 것이 빠르게 증가하였다. 즉, 표면균열길이 및 표면 균열깊이는 동일 균열 길이에서 응력비가 클수록 균열중횡비에 관계없이 증가율이 작아지고 있다. 그러나 동일 응력비의 표면균열길이에서 하한계응력확대계수의 증가율은 균열중횡비 0.4가 1.0보다 작으나, 표면 균열깊이는 균열중횡비 0.4가 1.0보다 크다. 이것은 균열중횡비가 크게 되면, 균열은 표면보다 깊이 방향으로 먼저 진전하고, 표면균열길이와 비슷하게 되면 동시에 진전하는 특성 때문이라 판단된다.





(a)



(b)

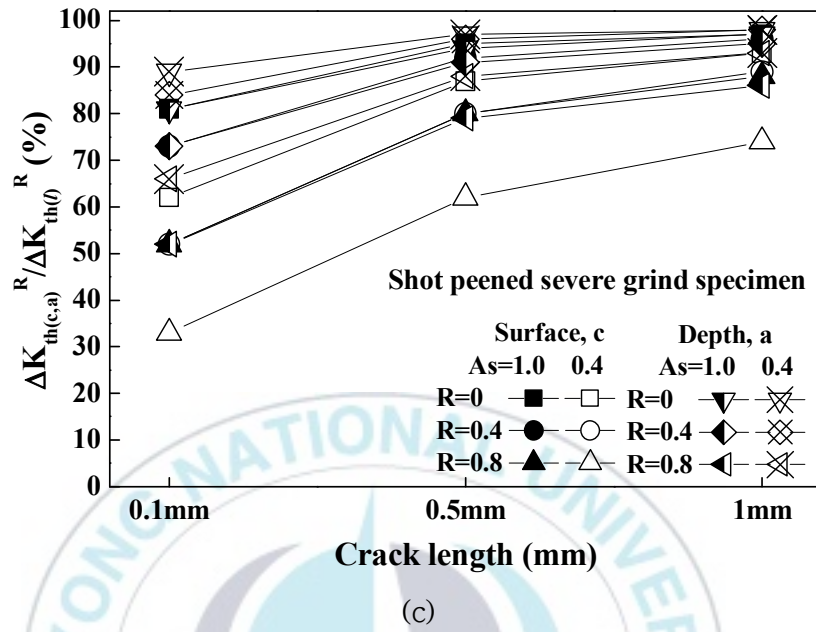


Fig. 11 Threshold stress intensity factor growth rate on surface and depth crack length of 0.1 mm, 0.5 mm and 1 mm. (a) Gentle grind specimen, (b) Severe grind specimen, (c) Shot peened severe grind specimen

5. 결론

구조물 등은 사용 도중에 재료 내부 또는 외부의 미소 결함에 의하여 균열로 발전한다. 이러한 균열은 구조물의 안정성 및 신뢰성에 영향을 미치며, 사용수명이 현저하게 줄어든다. 본 연구는 재료 가공 공정에서 발생하는 표면 상태에서 발생한 균열을 고려하여, 응력비 및 균열종횡비의 변화에 따르는 하한계응력확대계수 및 피로한도를 평가하였다. 얻어진 결론은 다음과 같다.

- (1) 연삭시험편, 황삭시험편 및 쇼트피닝 황삭시험편의 표면균열은 등가 균열길이를 사용하여, 응력비 및 균열종횡비에 따르는 하한계응력확대계수 및 피로한도를 평가할 수 있었다.
- (2) 피로한도는 표면균열길이가 증가함에 따라서 응력비 R 은 작고, 균열종횡비 A_s 는 큰 것이 빠르게 감소하였다. 반면, 표면균열깊이는 응력비 R 은 작고, 균열종횡비 A_s 는 작은 것이 빠르게 감소하였다.
- (3) 하한계응력확대계수는 표면균열길이가 증가함에 따라서 응력비가 작고, 균열종횡비가 큰 것이 빠르게 증가하였다. 반면, 표면균열깊이는 응력비가 작고, 균열종횡비가 작은 것이 빠르게 증가하였다.
- (4) 동일 응력비의 표면균열길이에서 피로한도의 감소율은 균열종횡비 0.4가 1.0보다 작으나, 표면균열깊이는 균열종횡비 0.4가 1.0보다 크다. 반면, 동일 응력비의 표면균열길이에서 하한계응력확대계수의 증

가율은 균열중횡비 0.4가 1.0보다 작으나, 표면균열깊이는 균열중횡비 0.4가 1.0보다 크다. 이것은 균열중횡비가 크게 되면, 균열은 표면보다 깊이 방향으로 먼저 진전하고, 표면균열길이와 비슷하게 되면 동시에 진전하는 특성 때문이다.



참고 문헌

- (1) Frost, N. E., 1957, “Non-propagating cracks in vee-notched specimens subject to fatigue loading” , The Aeronautical Quarterly, Vol. 8, Issue 1 , pp. 1~20.
- (2) Kitagawa, H. and Takahashi, S., 1976, “Applicability of fracture mechanics to very small cracks or cracks in the early stage. In: Proceedings of the second international conference on mech. Behavior of matls., ASM; pp. 627-631.
- (3) El Haddad, M. H., Topper, T. H. and Smith, K. N., 1979, “Prediction of non propagating cracks” , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, Issue 3, pp. 573~584.
- (4) Tange, A., Akutu, T. and Takamura, N., 1991, “Relation between shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel,” Transactions of Japan Society of Spring Engineers, Vol. 36, pp. 47~53.
- (5) Newman Jr, J. C. and Raju, I. S., 1981, “An empirical stress-intensity factor equation for the surface crack” , Engineering Fracture Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185~192.
- (6) Takahashi, K., Hayashi, T., Ando, K. and Takahashi F., 2010, “Evaluation of acceptable defect size by shot peening based on fracture mechanics,” Transactions of Japan Society of Spring Engineers, Vol. 55, pp. 25~30.
- (7) Nakagawa, M., Takahashi, K., Osada, T., Okada, H. and Koike, H.,

2014, “Improvement in fatigue limit by shot peening for high-strength steel containing crack-like surface defect (Influence of surface crack aspect ratio),” Transactions of Japan Society of Spring Engineers, Vol. 59, pp. 13~18.

(8) Fueki, R., Abe, H., Takahashi, K., Ando, K., Houjou, K. and Handa, M., 2015 “Harmless by peening for stainless steel containing a crack at the weld toe zone,” High Pressure Institute of Japan, Vol. 53, pp. 30~38.

(9) Yamada, Y., Eto, H., Konya, J. and Takahashi, K., 2018, “Influence of crack-like surface defects on the fatigue limit of nitrocarburized carbon steel,” 2018 International Conference on Material Strength and Applied Mechanics, Vol. 372. pp. 1~6.
doi:10.1088/1757-899X/372/1/012005

(10) Ando, K., Fueki, R., Nam, K. W., Matsui, K. and Takahashi, T., 2019, “A 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.

(11)

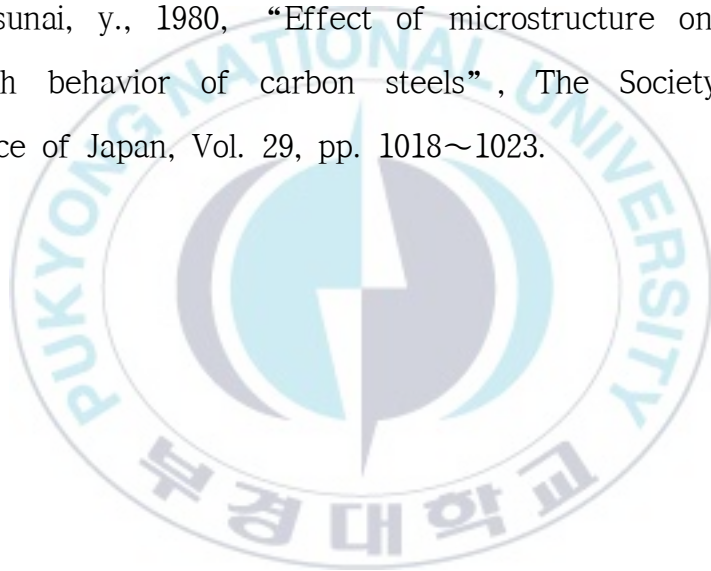
http://texas-shotpeening.metalimprovement.com/reason_to_shot_peen_metal_fatigue.php

(12) Kobayashi, M., Matsui, T. and Murakami, Y., 1998, “Mechanism of creation of compressive residual stress by shot peening,” International Journal of Fatigue, Vol. 20, pp. 351~357.

(13) Torres, M. A. S. and Voorwald, H. J. C., 2002, “An evaluation of

shot peening, residual stress and stress relaxation on the fatigue life of AISI 4340 steel,” International Journal of Fatigue, Vol. 24, pp. 877~886.

- (14) Takahashia, K., Osedoa, H., Suzukia, T. and Fukuda, S., 2018, “Fatigue strength improvement of an aluminum alloy with a cracklike surface defect using shot peening and cavitation peening,” Engineering Fracture Mechanics, Vol. 193, pp. 151~161.
- (15) Kitsunai, y., 1980, “Effect of microstructure on fatigue crack growth behavior of carbon steels” , The Society of Materials Science of Japan, Vol. 29, pp. 1018~1023.



발표 논문

1. 김민현, 이원구, 남기우, 김동규, 왕재필, 강창룡, (2019), “표면상태에 따르는 표면균열재의 피로한도 특성”, 2019년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회논문집, pp. 275-276.

Min-Heon Kim, Won-Gu Lee, Ki-Woo Nam, Dong-Gyu Kim, Jei-Pil Wang and Chang-Yong Kang (2019), “Fatigue Limit Property of Surface Cracked Specimen according to Surface Condition”, Proceeding of The KSME 2019 Spring Annual Meeting, pp. 275-276.

2. 김민현, 이원구, 김동규, 안석환, 남기우, 2019, “표면상태에 따르는 표면균열재의 하한계응력확대계수”, 한국동력기계공학회 2019년도 춘계학술대회논문집, pp. 31-32.

Won-Gu Lee, Min-Heon Kim, Dong-Gyu Kim, Seok-Hwan Ahn *and Ki-Woo Nam, 2019, “Threshold Stress Intensity Factor of Surface Cracked Specimen according to Surface Condition”, Proceeding of The Korean Society for Power System Engineering 2019 Spring Annual Meeting, pp. 31-32.

감사의 글

박사학위 논문의 심사를 위해 애써주신 주심 김태일 박사님과 김철수 박사님께 감사의 마음을 전합니다. 그리고 박사 학위 논문의 완성을 위하여 많은 실험에 도움을 준 재료강도 및 비파괴연구실 대학원생 및 학부생들에게 감사를 드립니다. 그동안 여러 가지 격려와 조언을 아끼지 않았던 남기우 지도교수님께 감사를 드립니다.

그리고 항상 나의 길을 응원해 준 아내 이은경에게 고마운 마음을 전합니다.

또한, 저를 도와주시고, 이끌어주시고, 격려해주신 모든 분들께 감사를 드리며, 이 영광을 오랫동안 함께 나누고 싶습니다.

2019년 6월

