

<論 文>

링 압인으로 인한 잔류 압축 응력이 피로 균열  
성장율에 미치는 영향

이 강 용\* · 강 증 목\*\*

(1984년 2월 28일 접수)

The Effects of Residual Compressive Stress Induced by  
Ring Indentation on Fatigue Crack Growth Rate

Kang Yong Lee and Jong Mug Kang

Abstract

This thesis is an experimental research to observe the decrease in fatigue crack growth rate due to the residual compressive stress induced by the circular-cross-section ring indentation around the notch.

To observe the retardation of crack growth induced by solely residual compressive stress, relations between the crack length and cycle number are obtained and compared, using the two identically shaped specimens such as circular-cross-section ring indentation one and circular-cross-section ring cut-out one.

As the indentation load increases, although the specimen thickness under the indented region becomes thinner, the fatigue crack growth rate is reduced as a result of the effects of the increased residual compressive stress. It is observed that critical indentation load arrests the crack growth.

It is also shown that as the indentation position approaches the notch, the fatigue life increases and that the cut-out around the notch increases the fatigue crack growth rate slightly.

In static test, the fracture strength is shown to be little increased by indentation around the notch.

1. 서 론

실제 구조물이 파괴되는 것은 주로 피로 하중에 의한 것이 많다. 피로 하중을 받으면 노치와 같은 응력 집중 현상이 발생하는 곳에서 먼저 균열이 발생하여 발

생된 균열이 성장하므로 최종적으로 파괴에 이르게 된다. 따라서 설계자로서는 파괴를 방지하기 위해 응력 집중이 되는 곳에서 균열이 발생하지 못하도록 하거나 발생하였다 하더라도 성장을 저지(crack arrest)시키거나 균열의 성장을 지연(retardation)시키기를 원한다. 이중 발생된 균열의 성장을 저지내지는 지연시키는 방법으로 현재까지 일반적으로 사용된 것은 균열 앞에 보강재를 부착하거나<sup>(1,2,3)</sup>, 균열 첨단에 구멍을 파서 응력

\* 정회원, 연세대학교 기계공학과

\*\* 연세대학교 대학원 기계공학과

세기(stress intensity) 현상을 응력 집중(stress concentration) 현상으로 완화시키는 방법<sup>(4)</sup>을 쓰고 있다. 그러나 보강재 부착 방법은 구조물이 아닌 기계 요소에는 적용하기에 문제가 있으며 구멍을 파는 방법은 구멍으로 인한 강도 저하의 문제를 유발할 수 있다. 따라서 구조물이나 기계 요소에도 적용 가능하면서 강도 저하보다 강도값에 약간의 증가를 줄 수 있으면 피로 균열의 성장을 저지내지는 지연시키는 효과적인 방법이 요구된다. 생각할 수 있는 방법으로는 피로 균열이 발생될 곳에 미리 잔류 압축응력을 발생시키는 것이다. 잔류 압축 응력이 피로 균열성장을 지연시킬수 있다는 보고는 기존 연구로서 짐작할 수 있다. 즉 Almen과 Black<sup>(5)</sup>은 쇼트 피이닝(shot peening)으로 발생한 잔류 압축 응력으로 연강의 고주파수명(high cyclic life)를 약 10 배 가량 증가시킬 수 있었고 침탄강(carburized steel)에 대해서는 훨씬 더 증가시킬 수 있다고 보고하고 있다.

Wheeler<sup>(6)</sup>는 피로 하중 도중에 과부하(over load)가 걸리는 경우에 형성되는 소성영역 크기와 과부하가 걸리지 않을 때의 소성영역의 비(ratio)에 대한 지수함수(power function)인 지연 매개 변수(retardation parameter)를 도입하여 갑작스럽게 과부하가 걸리는 경우에 대해서 지연 현상을 설명하는 지연모형(retardation

model)을 제시하였다. Ducre, Beevers와 Walker<sup>(7)</sup>는 저 강도 평면 C-Mn 강(low strength plain C-Mn steel)을 사용하여 피로 균열 성장 지연에 관한 연구를 하였다. 이 연구에서 최대 응력 세기 계수  $K_{max}$  과 응력 세기 계수 범위  $\Delta K$ 가 피로균열 성장지연에 주는 영향에 대해 관찰하였는데 최대 응력 세기 계수의 영향이 균열성장 지연에 더 큰 영향을 준다는 결과를 잔류응력의 개념을 이용하여 설명하였다. 한편 압인으로 인한 변형도 분포에 관한 연구로서 Sehgal과 Kobayashi<sup>(8)</sup>가 SAE 1215 강으로 압인 하중과 변위의 관계를 자유 표면(free surface)에서 측정하고 압인 위치에 가까울수록 압축 변형도는 증가하고 있음을 밝혔다. 이러한 기존의 결과를 토대로 피로균열이 발생할 곳에 압인으로 잔류 압축 응력을 주면 압인하중의 정도에 따라 균열의 저지내지는 지연을 가능케 할 수 있다고 생각된다. 이와 같은 방법에 의한 피로 균열 성장 거동에 관한 연구는 아직 알려지지 바가 없는 것 같다.

따라서 본 연구에서 원형 단면 링 압인(circular-cross-section ring indentation)을 노치 주위에 주고 피로 하중하에서 발생한 균열이 성장하는 거동을 관찰하고 해석 하므로써 균열의 저지 및 지연 방법으로써 가능성을 제시하고자 한다.

Table 1(a) Chemical compositions of Al alloy 5052

Elements	Mg	Cr	Si+Fe	Cu	Mn	Zn	Each of other elements	Al
%	2.2~2.8	0.15~0.35	0.45max	0.1max	0.1max	0.1max	0.05~0.15max	Remained

Table 1(b) Mechanical properties of Al alloy 5052

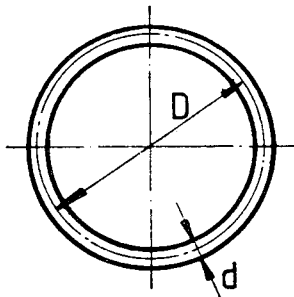
Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elastic modulus (kgf/mm <sup>2</sup> )
19.686	9.140	7171.311

Table 2(a) Chemical compositions of SWRH 67B

Elements	C	Si	Mn	P	S	Fe
%	0.64~0.71	0.15~0.35	0.60~0.90	0.030max	0.030max	Remained

Table 2(b) Mechanical properties of SWRH 67B

Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield strength (kgf/mm <sup>2</sup> )
162.75	128.65



$D = \phi 13, \phi 30, \phi 40$   
 $d = \phi 4$   
 Fig. 1 Dimensions of ring(unit : mm)

## 2. 실험

### 2.1. 시편제작

본 실험에서 사용한 시편의 재료는 균열 성장특성이

**Table 3** Classification of specimens

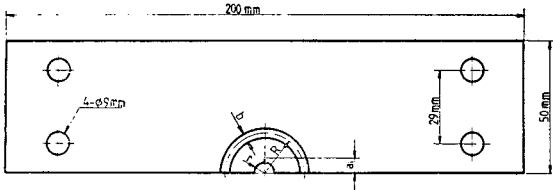
Specimen classification	Method of ring marking	Ring diameter (mm)	Specimen identification
Circular-cross-section ring indentation specimen	By 8000kgf indentation load	30	CRI(8000)
	By 9500kgf indentation load	30	CRI(9500)
	By 11000kgf indentation load	30	CRI(11000)
	By 12500kgf indentation load	30	CRI(12500)
	By 14000kgf indentation load	30	CRI(14000)
	By indenting a specimen to the dimensions of indentation which is obtained from CRI(9500)	13	CRI[13]
	By indenting a specimen to the dimensions of indentation which is obtained from CRI(9500)	30	CRI[30]
Circular-cross-section ring cut-out specimen	By grooving the ring marking corresponding to 8000kgf indentation load	30	CRC(8000)
	By grooving the ring marking corresponding to 9500kgf indentation load	30	CRC(9500)
	By grooving the ring marking corresponding to 11000kgf indentation load	30	CRC(11000)
	By grooving the ring marking corresponding to 12500kgf indentation load	30	CRC(12500)
	By grooving the ring marking corresponding to 14000kgf indentation load	30	CRC(14000)
Specimen without circular-cross-section ring indentation and cut-out	No ring marking	O	P

가능한 알루미늄합금(aluminium alloy) 5052를 사용했다. 시편의 화학성분과 기계적 성질은 Table 1(a)(b)와 같다.

압인을 내기 위한 링은 Fig. 1과 같이 지름 4mm의 경강재선(SWRH 67B)을 사용하여 지름이 각각 13mm, 30mm, 40mm 크기의 링으로 가공하였다. 링의 화학성분과 기계적 성질은 Table 2(a)(b)와 같다.

원형 단면 링 압인(circular-cross-section ring indentation) 시편은 폭 100mm, 길이 200mm, 두께 2mm의 알루미늄 합금판에 지름 30mm인 링을 판의 중앙에 놓고 Shimadzu RH-30형 만능재료 시험기를 이

용하여 8,000kgf, 9,500kgf, 11,000kgf, 12,500kgf, 14,000kgf의 5가지 압축하중을 가하여 압인을 낸 후 판의 중앙에 지름 8mm의 구멍을 뚫고 전단기(shearing machine)로 폭을 2등분하여 Fig. 2와 같이 제작하였다. 링의 지름이 13mm, 40mm인 원형 단면 링 압인 시편은 압인하중이 9,500kgf일때의 링 지름 30mm인 원형 단면 링압인의 폭과 깊이가 같도록 압인한 후 위의 순서에 따라 제작하였다. 그리고 5종류의 원형 단면 링 홈(circular-cross-section ring cut-out)시편은 각 압인 하중으로 인한 압인의 폭과 깊이를 측정하여 선반가공하였다.



$R=6.5\text{mm}, 15\text{mm}, 20\text{mm}$       $a_i=6\text{mm}$   
 $B=2\text{mm}$       $r=4\text{mm}$   
 $b=1.1\text{mm}, 1.3\text{mm}, 1.5\text{mm}, 1.67\text{mm}, 1.85\text{mm}$   
**B; Thickness**

Fig. 2 Dimensions of test specimen

Fig. 3(a)는 압인 하중에 따른 압인 깊이이고, Fig. 3 (b)는 압인하중에 따른 압인폭이다. 이렇게 가공한 시편의 노치 끝에 실력으로 1mm 길이의 예리한 홈을 내고 1,000rpm, Shimadzu 만능 피로 시험기 UF-500 형으로 공칭 응력 최소 0.5kgf/mm<sup>2</sup>, 최대 6.5kgf/mm<sup>2</sup>의 피로 하중을 가해 6mm 선 피로 균열(pre-fatigue crack)을 발생시켰다.

제작한 시편은 균열이 진행할 경로 주위에 #800, #1000, #1200 사포의 순서로 연마하고 광택을 낸후 192-106 형 Mitutoyo 높이계기(height gauge)로 노치 침단으로 부터 4mm 간격으로 참고표시(reference ma-

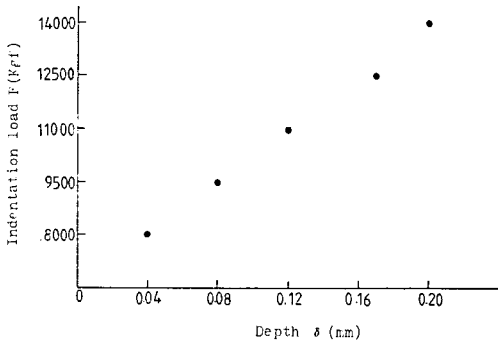


Fig. 3(a) Indentation load and depth of test specimen

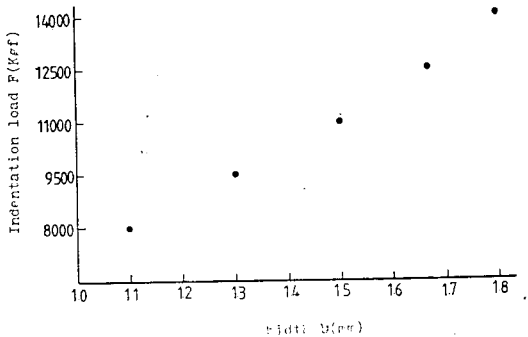


Fig. 3(b) Indentation load and width of test specimen

rk)하였다.

위에서 제작한 시편을 Table 3 와 같이 분류하였다.

2.2. 실험방법

완성된 시편을 Shimadzu 만능 피로 시험기 UF-500 형으로 공칭응력 최소 0, 최대 6kgf/mm<sup>2</sup>의 피로 하중을 가하여 피로 시험을 하였다. 균열길이의 측정은 20 배의 이동 현미경을 사용하였다. 5 종류의 CRC 시편과 1 종류의 P 시편, 그리고 CRI(8000)시편은 5×10<sup>3</sup> 사이클 간격으로 측정하고 CRI(9500), CRI(11000) CRI(12500), CRI(14000) 시편은 1×10<sup>4</sup> 사이클 간격으로 균열 길이 a 를 측정하였다. 한편 정하중 시험으로써 P 시편과 5 종류의 CRI 시편을 Shinkoh 만능 재료시험기 TOM5000 형으로 시험하여 파괴 응력  $\sigma_f$  를 측정하였다. 이때 크로스헤드 속도(cross head speed)는 1 mm/min 으로 하였다.

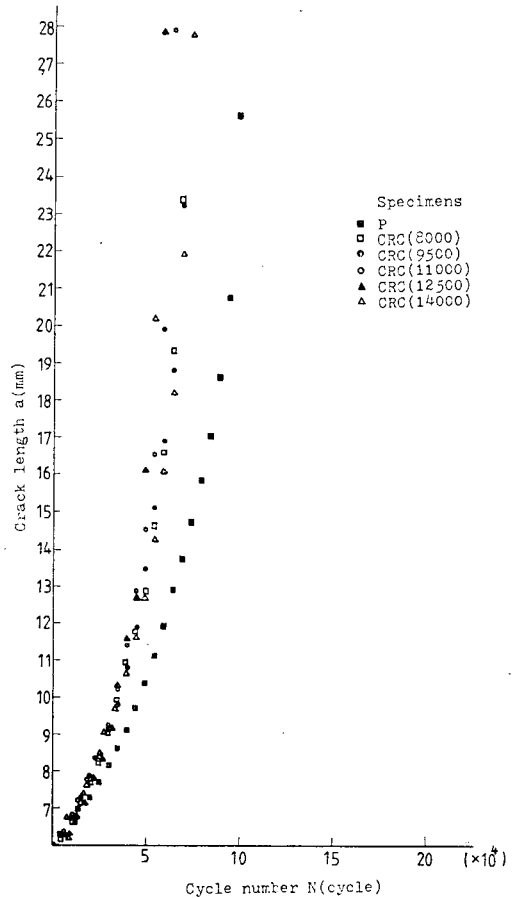


Fig. 4 Relationship between crack length and cycle number for P and CRC specimens

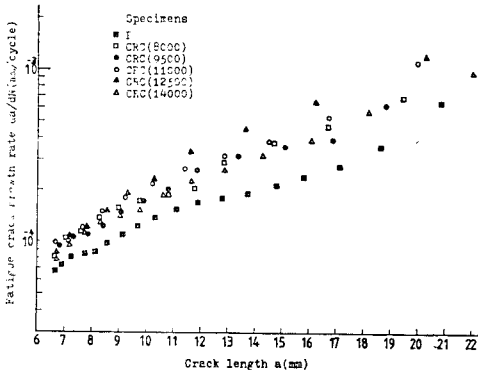


Fig. 5 Relationship between fatigue crack growth rate and crack length for P and CRC specimen

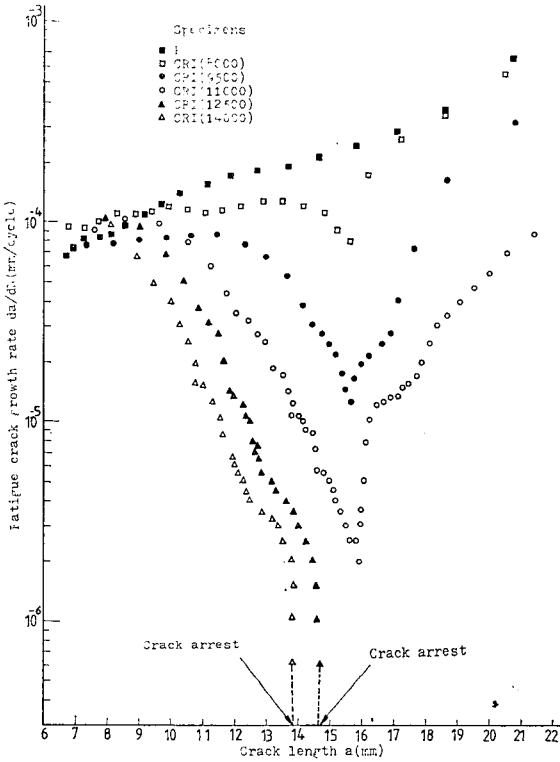


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rate and crack length for P and CRI specimens

### 3. 실험결과 및 고찰

5 종류의 CRC 시편과 1 종류의 P 시편에 대한 균열 길이  $a$  와 사이클 수  $N$  과의 관계를 Fig. 4 에 나타내

었고 피로 균열 성장률  $da/dN$  과 균열 길이  $a$  와의 관계를 Fig. 5 에 나타내었다. Fig. 4 와 Fig. 5 로 부터 흠이 피로 수명을 감소시키고 피로 균열 성장률을 증가시키는 결과를 준다는 것을 알 수 있다. 그러나 그 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 이러한 현상은 각 시편에서 흠의 폭과 깊이 치수가 작기때문이라고 생각된다. 그러나 흠이 피로 수명을 감소시키고 균열 성장을 촉진시킨 결과는 흠이 일종의 노치현상으로 작용하여 균열첨단의 인장 능력을 증가시킴으로써 나타난 현상인 것으로 생각된다.

5 종류의 CRI 시편과 1 종류의 P 시편에 대한 피로 균열 성장률  $da/dN$  과 균열길이  $a$  와의 관계를 Fig. 6 에 나타내었다. Fig. 6 에서 CRI 실험치는 압인을 줌으로써 발생하는 잔류 응력과 압인 흠의 발생으로 인한 시편 형상의 변화에 대한 영향이 서로 복합되어 일어난 결과이다. Fig. 6 로 부터 압인 하중이 증가함에 따라 압인 부위의 두께가 감소하고 압인 흠이 노치현상으로

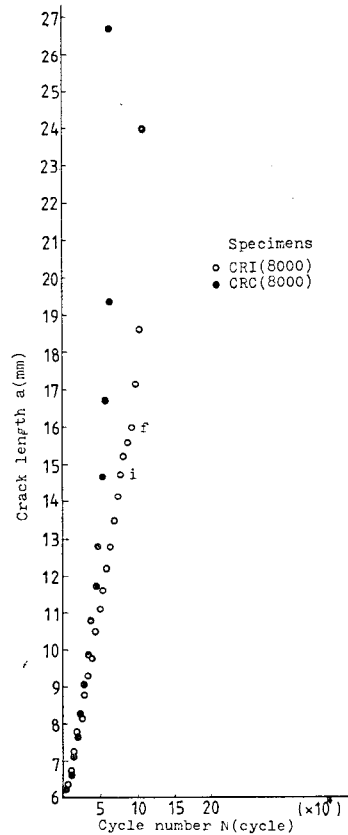


Fig. 7 Relationship between crack length and cycle number for CRI(8000) and CRC(8000) specimens

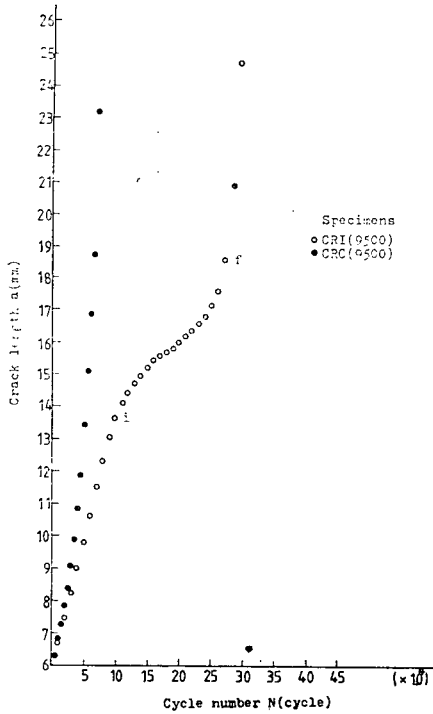


Fig. 8 Relationship between crack length and cycle number for CRI(9500) and CRC(9500) specimens

작용함에도 불구하고 압인으로 인한 잔류 압축 응력의 증가로 균열성장의 지연효과가 증가된다는 것과 압인의 위치 주위에서 그 지연효과는 최대가 되고 균열 성장이 저지되는 임계압인 하중은 11,000kgf와 12,500 kgf 사이에 있음을 알 수 있는데 이 하중보다 큰 14,000 kgf에서는 균열지연이 압인위치인 15mm 이전에서 일어났음을 보여주고 있다. 이러한 결과로 보아 높은 압인 하중에서는 압인위치보다 훨씬 이전에서도 균열저지가 가능하다고 하겠다.

순수한 잔류압축응력의 영향을 관찰하기 위해서 압인시편(CRI)과 동형인 흠이진 시편(CRC)의 실험치를 Fig. 7에서 Fig. 11까지 비교하고 있다. 이러한 비교로부터 피로시험에서 실험값의 흠어짐(scattering)을 고려하여 생각하면 잔류압축응력의 영향을 받지 않는 영역에서는 동형의 CRI나 CRC 시편의 균열거동은 서로 같고 잔류압축응력의 영향권내에서는 잔류압축응력의 영향으로 피로균열 성장률이 감소한다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 12와 같은 이상적인 균열길이와 사이클 수와의 관계곡선을 그릴 수 있다. Fig. 12에서

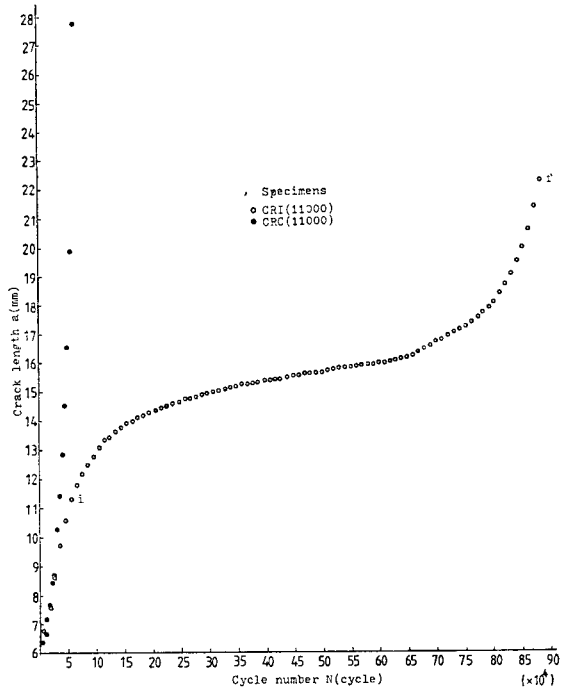


Fig. 9 Relationship between crack length and cycle number for CRI(11000) and CRC(11000) specimens

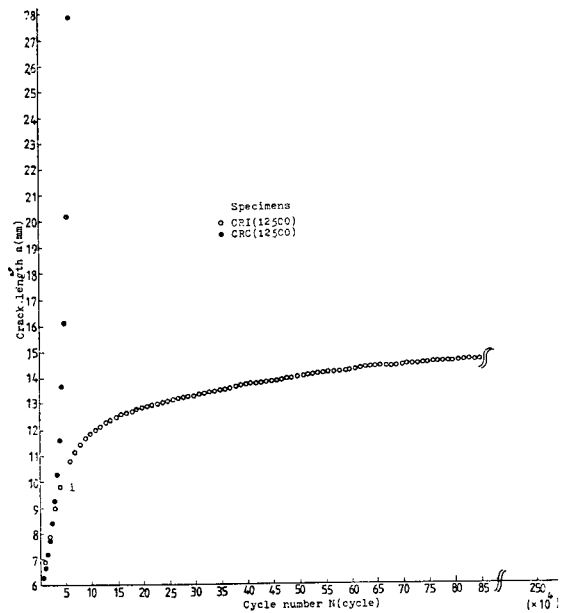


Fig. 10 Relationship between crack length and cycle number for CRI(12500) and CRC(12500) specimens

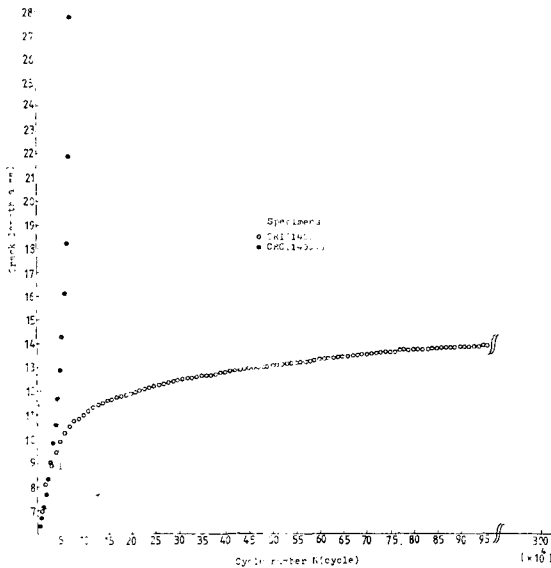


Fig. 11 Relationship between crack length and cycle number for CRI(14000) and CRC(14000) specimens

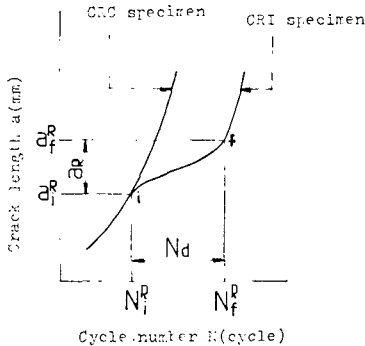


Fig. 12 Comparison of relations of crack length and cycle number in CRI and CRC specimens of infinite width dimensions

피로균열 성장률이 감소하기 시작하는 점의 균열 길이를  $a_i^R$ , 이 균열 길이를 지나 피로균열 성장률이 다시 같아지는 균열 길이를  $a_f^R$ 로 표시하고 있고  $a_i^R$ 과  $a_f^R$ 에서의 사이클 수를 각각  $N_i^R$ ,  $N_f^R$ 이라 정의하고 있다. 한편 지연되는 사이클 수  $N_d$ (delayed cycle number)는  $N_f^R$ 과  $N_i^R$ 과의 차이로 표시하였다. 그리고  $a_f^R$ 과  $a_i^R$ 과의 차이를  $a_R$ 로 표시하고 이를 유효 잔류 압축 응력의 영역크기(effective residual compressive stress zone size)로 정의한다. 이러한 해석 방법으로 Fig. 7에서 Fig. 11까지에서  $a_i^R$ 의 위치 변화 및  $N_i^R$  값의 변화(즉 그림에서  $i$ 점의 위치 변화)를 살펴보면 피로시험에서 실험치의 흠어짐을 고려해 놓고 볼때

압인하중의 증가에 따라  $a_i^R$ 이 노치에 점점 가까워지고  $N_i^R$ 의 값은 점점 적어짐을 알 수 있다. 한편 균열성장의 지연이 끝나는 균열 길이  $a_f^R$ 과 그때의 사이클 수  $N_f^R$ 의 변화(즉 그림에서  $f$ 점의 위치 변화)는 시편 폭이 제한되어 있어서 압인하중이 높은 경우 즉 11,000kg 이상인 경우에는  $a_f^R$  이전에 균열성장이 저지 되었음을 알 수 있으며 그 이하의 압인 하중에서는 압인 하중의 증가에 따라  $a_f^R$ 과  $N_f^R$ 이 증가 되었음을 알 수 있다. 따라서 압인 하중의 증가는 피로 수명을 증가시키는 결과를 준다.

링의 지름이 13mm, 40mm 인 두 종류의 CRI 시편을 링의 지름이 30mm 인 CRI(9500)시편과 압인의 폭과 깊이가 같도록 압인하여 피로시험한 균열 길이와 사이클 수와의 관계를 Fig. 13에서 나타내고 있다. 이 곡선들을 서로 비교하여 보면 알 수 있듯이 링의 지름이 작을수록 지연효과가 증가하여 피로수명이 증가함을 알 수 있다. 링의 지름이 13mm 인 시편은 잔류압축응력의 영향이 매우 커서 선 피로균열(pre-fatigue crack)

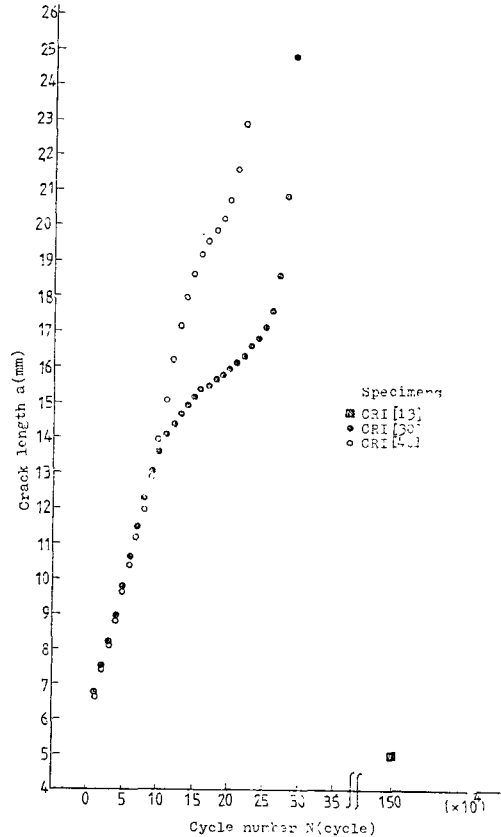


Fig. 13 Effect of distance from notch of circular-cross-section ring indentation on crack growth

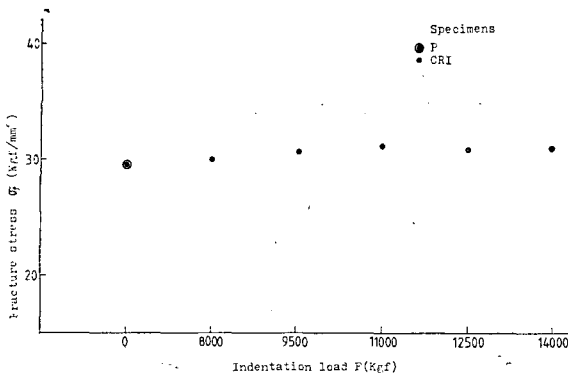


Fig. 14 Fracture stress of P and CRI specimens

이 성장하지 못했음을 보여 준다. 이러한 결과는 노치에 가까울수록 작은 하중의 압인으로 균열 성장을 저지시킬 수 있음을 뜻한다.

Fig. 14는 정하중 시험에 의해 CRI(8000), CRI(9500), CRI(11000), CRI(12500), CRI(14000)시편과 P시편으로부터 얻은 파괴 응력  $\sigma_f$  값을 비교하고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 5종류의 CRI시편이 P시편의 파괴응력보다 약간 큰 값을 주나 큰 차이가 없음을 보여주고 있는데 이는 압인 하중의 증가에 따라 압인에 의해 시편의 단면적이 감소하고 반면에 잔류압축응력이 증가되므로써 서로 상반적인 효과로 인해 파괴응력값이 거의 같은 값을 나타내는 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

링의 압인으로 인한 잔류 압축 응력이 노치에서 발생한 피로균열에 미치는 영향을 관찰하기 위해 원형 단면 링 압인(circular-cross-section ring indentation) 시편과 원형 단면 링 홈(circular-cross-section ring cut-out) 시편 및 압인도 홈도 없는 시편을 피로 시험하여 연구한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압인 하중이 증가하면 압인 부분의 시편 두께가 감소함에도 불구하고 잔류 압축 응력의 크기와 영역이 증가해서 지연이 시작하는 균열 길이는 노치에

서 가까워지며 지연이 끝나는 균열 길이는 노치에서 멀어져 피로 수명이 증가하게 된다.

- (2) 압인의 위치를 노치에서 가까이 할수록 피로 수명은 증가하며 효과적으로 균열발생을 저지할 수 있다.
- (3) 노치 주위의 좁은 피로균열 성장률을 크게 증가시키지는 못한다.
- (4) 노치 주위에 압인을 하여도 정하중 시험에서 얻어지는 파괴강도에는 별 영향이 없다.

#### References

- (1) I.R. Mccoll and I.G. Morley, "Suppression of Fatigue Crack Growth in Aluminium Alloy Sheets", Int. Journ. of Fracture, 18, 191-216, 1982
- (2) H. Vlioger, "Residual Strength of Cracked Stiffened Panels", Eng. Fract. Mech., Vol. 5, pp. 447~478, 1973
- (3) D. Broek, "Elementary Engineering Fracture Mechanics", Sijthoff & Noordhoff, Int. Pub. CH. 16, pp. 377~401, 1978
- (4) R.W. Hertzberg, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials", John Wiley & Sons, pp. 237~238, 1976
- (5) T.O. Almen and P.M. Black, "Residual Stresses and Fatigue in Metals", McGraw-Hill, New York, 1963
- (6) O.E. Wheeler, "Spectrum Loading and Crack Growth", ASME Publ., 1971
- (7) S.G. Druce, C.J. Beevers and E.F. Walker, "Fatigue Crack Growth Retardation Following Load Reductions in a Plain C-Mn Steel", Eng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 385~395, 1979
- (8) M.M. Sehgal and Shiro Kobayashi, "Plastic Indentation of Steel Cylinders with Circular Punches" Trans. of the ASME, Journal of Eng. for Industry, Nov. pp. 1035~1044, 1972