

쇼트피닝한 스프링강의 피로균열진전 연구

박경동[†] · 진영범^{*}

부경대학교 기계공학부 · *부경대학교 기계공학부 대학원
(2004. 7. 8. 접수 / 2004. 11. 25. 채택)

A Study of Fatigue Crack Growth in Shot Peened Spring Steel

Keyungdong Park[†] · Youngbeom Jin^{*}

Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University

^{*}Department of Mechanical Engineering, Graduate School, Pukyong National University

(Received July 8, 2004 / Accepted November 25, 2004)

Abstract : Antifatigue failure technology take an important the part of current industries. Currently, the shot peening is used for removing the defect from the surface of steel and improving the fatigue strength on surface. Therefore in this paper the effect of compressive residual stress by shot peening on fatigue crack growth characteristics in stress ratio($R=0.1,0.3,0.6$)was investigated with considering fracture mechanics. There is difference between shot peening specimen and unpeening specimen. Fatigue crack growth rate of shot peening specimen was lower than that of unpeening specimen. Fatigue life shows more improvement in the shot peening material than in the unpeening material. And compressive residual stress of surface on the shot peening processed operate resistance force of fatigue crack propagation. That is the constrained force about plasticity deformation was strengthened by resultant stress, which resulted from plasticity deformation and compressive residual stress in the process of fatigue crack propagation.

Key Words : crack growth, stress ratio, fatigue life, fatigue crack, compressive residual stress

1. 서 론

일반산업과 대형구조물에 있어서 설계 및 구조건전성 평가 및 파손방지를 위한 다각적인 노력에도 불구하고 예기치 않는 파손 사고가 일어나 인명이나 물적 재산에 많은 피해를 준다. 이에 대형 중요 구조물이나 항공기 선박, 건설 등에서 구조물 파괴를 방지하기 위해 학문적 연구 분야로 파괴역학의 발전을 연구하고 있다¹⁾. 재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다²⁾. 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래 할 수 있기에 현재와 같이 대형화된 산업기술 사회에 피로파괴의 방지 기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 쇼트피닝 가공에 의해 금속 표면부에

형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시키므로 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시키고, 균열의 안정성장을 지연시켜어 피로수명을 향상하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다^{3,4)}. 본 논문에서는 실험적으로 어려운 스프링강(JISG SUP-9)에 대하여 피로수명 및 기계적 성질을 개선하고자 언피닝재에 쇼트피닝 가공하여 주파수는 10 Hz, 응력비는 $R = 0.1$, $R = 0.3$, $R = 0.6$ 으로 실험하여 피로강도 향상과 피로수명 향상에 대하여 연구하고자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1

[†]To whom correspondence should be addressed.
parkkd@pknu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of specimen (wt%)

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

Table 2. Mechanical properties of specimen

Material	Tensile strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield strength (MPa)
		After quenching	After tempering	
JISG SUP-9	1,226	55	47	1,079

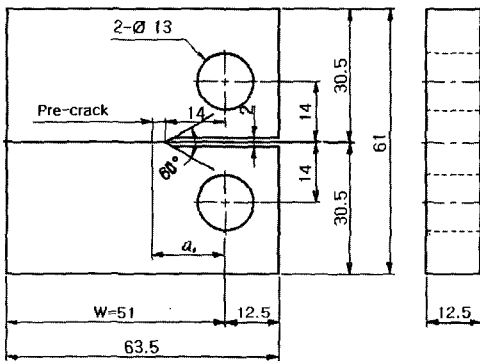


Fig. 1. Dimension of CT specimen(unit : mm)

과 같고, Table 2는 열처리(quenching & tempering) 한 시험편 재료의 기계적 성질이다.

본 시험편은 피로균열진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편을 두께 12.5mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 프랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다.

각부 치수는 ASTM E647-93의 기준⁴⁾에 따라 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어 커팅 방진가공기에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다. 그리고, 가공된 노치의 영향과 균열 침단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25℃정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위 내에서 3mm의 피로예비균열을 주었다.

2.2. 쇼트피닝 가공

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 균일한 압축잔류응력을 부여하기 위해 Fig. 2 형상의 치구에 고정시켜 Table 3과 같은 조건 하에서 고속회전 터빈방식의 쇼트피닝기로 가공하였다.

Table 3. Condition of shot-peening

Impeller diameter (mm)	Shot velocity (m/sec)	Shot Ball diameter (mm)	Arc height (mm)	Cover-age (%)
490	70	0.8	0.49	95

Table 4. Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	X-Ray Source	Target
	Voltage	30KV
	Current	10mA
ψ	0°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140°~170°	
Diffraction	Scintillation counter	

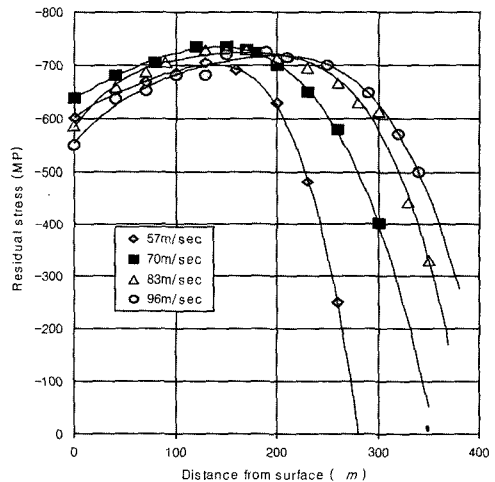


Fig. 2. Compressive residual stress distributions made by shot peening

2.3. 압축잔류응력

쇼트피닝 가공된 시험편의 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(Rigaku-MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 2와 Table 5를 보면 투사속도 70m/sec에서 최대 압축잔류응력이 형성되었고 70m/sec를 기점으로 그 이상의 속도에서는 점차 감소되는 것이 관찰되었다. 이 현상은 지나친 투사속도에 의하여 발생하는 과도한 투사에너지의 영향으로 피가공물의 압축 잔류 응력치를 오히려 감소시키는 오버피닝 현상으로 판단된다.

Table 5. The Maximum of residual stress and depth

Shot velocity	Maximum of residual stress	Depth
57m/sec	705MPa	120 μ m
70m/sec	735MPa	150 μ m
83m/sec	730MPa	180 μ m
96m/sec	726MPa	200 μ m

그리고 Tange와 Takamuras⁶⁾는 금속의 표면 압축 잔류응력값을 높일수록 피로강도가 증가하여 피로 수명이 향상된다고 보고하였는데, 본 실험결과 투사 속도가 70m/sec일 때 표면의 압축잔류응력이 가장 높게 나타나므로 피로수명 향상에 가장 효율적인 투사속도는 70m/sec로 판단된다.

2.4. 피로균열진전 실험

피로균열 진전실험은 전기유압서보 피로시험기 (INSTRONE 8501)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 응력비는 R = 0.1, R = 0.3, R = 0.6 주파수는 10Hz로 하였으며 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 compliance법으로 ASTM E647-95a⁶⁾ 규정에 따라 실험하였다. 시험편의 초기균열은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 10MPa \sqrt{m} 로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위 내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기균열진전 길이 3~5mm지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 감소법으로⁷⁾ 하여 피로균열진전이 정지될 때까지 실험하였다.*

본 실험에서 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+a)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4)$$

단, $\alpha = a/W$ ($a/W \geq 0.2$)

3. 실험결과 및 고찰

3.1. 피로균열 진전 특성의 응력비 영향

Fig. 3은 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6에서 쇼트 피닝 시편의 피로균열진전속도비 da/dN와 응력확대 계수 ΔK 의 관계를 도시하였다.

Table 6은 응력확대계수 $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도비 da/dN을 수치적으로 비교하였다.

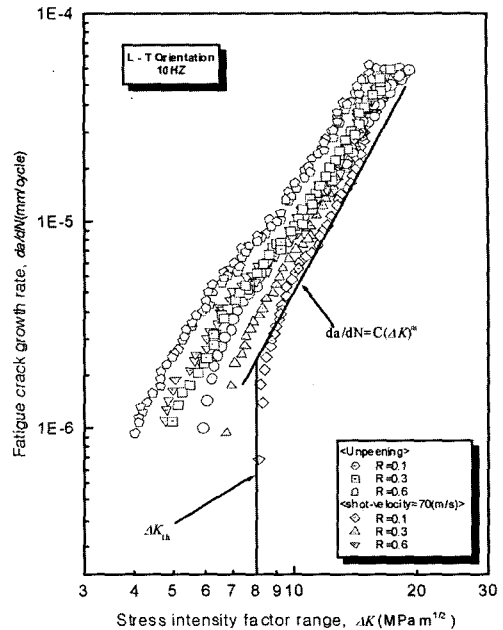


Fig. 3. Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Table 6. da/dN at $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$

Stress ratio	Unpeening(A)	Shot peening(B)	B/A×100(%)
0.1	8.38×10^{-6}	4.49×10^{-6}	53
0.3	9.08×10^{-6}	5.32×10^{-6}	58
0.6	1.15×10^{-5}	8.59×10^{-6}	74

언피닝과 쇼트피닝시편 모두 응력비가 증가할수록 피로균열진전속도비가 증가되는 경향을 보이고 있으나, 응력확대계수 ΔK 가 크고 R=0.3이하의 응력비에서 압축잔류응력의 영향이 크게 작용하는 것으로 나타났다. 이와 같이 쇼트피닝 가공에 의한 시험편 표면부의 압축잔류응력은 초기균열진전뿐만 아니라 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 작용하여 압축잔류응력이 증가할수록 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 높게 형성되는 것을 볼 수 있다⁸⁾.

3.2. 각 응력별 피로균열 진전길이와 사이클 수의 관계

Fig. 4는 상온 25 $^{\circ}$ C에서 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6의 환경을 적용하여, 응력비별 균열길이 a와 하중 반복사이클 N과의 관계를 도시하였다. Table 7은 균열길이 28mm 지점을 기준으로 하여 수치로 비교하였다. 각 응력비에서 사이클수는 쇼트피닝재가 언

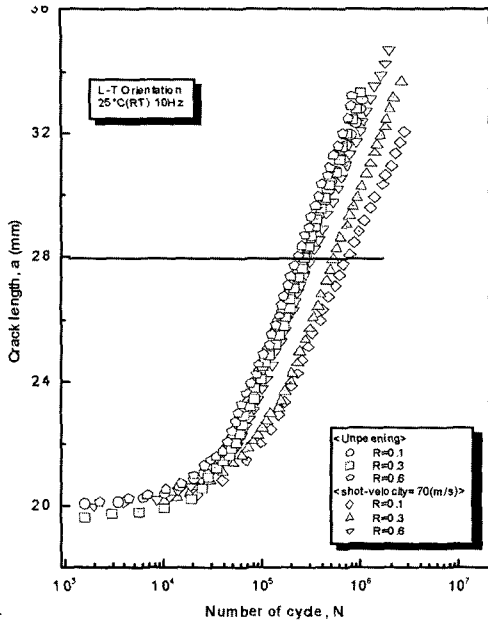


Fig. 4. Relation between crack length and number of cycle

Table 7. Number cycle at the crack length of 28mm

Stress ratio	Unpeening(A)	Shot peening(B)	B/A×100(%)
0.1	4.8×10^5	1.1×10^6	129
0.3	4.5×10^5	8.7×10^5	93
0.6	4.1×10^5	5.3×10^5	30

피닝재에 비하여 응력비 R=0.1에서 129%, R=0.3에서 93%, R=0.6에서 30%가 증가되었다. 이처럼 쇼트피닝재가 언피닝재보다 피로수명이 향상되었는데 이는 극표면에 생성된 압축잔류응력이 표면에서 균열선단의 구속력으로 작용하여 쇼트피닝재가 언피닝재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

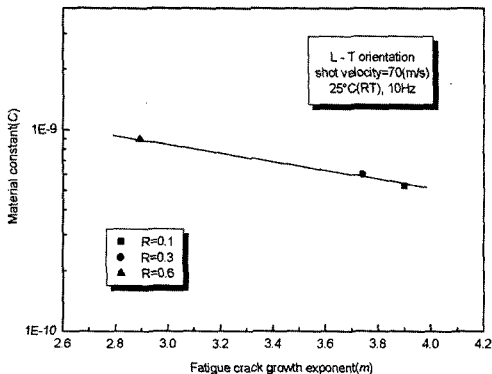


Fig. 5. Correlations between C and m in paris equation

3.3. 재료상수(C)와 피로균열 진전지수(m)와의 관계

Fig. 5에는 응력비에 따른 피로균열진전지수 m과 재료상수 C와의 관계를 나타낸 것으로 m은 응력비 R=0.1과 R=0.3까지 증가하다가 R=0.6에서는 감소하였으며 C와 m값은 서로 반대의 경향을 나타냈다.

3.4. 하한계특성과 응력비와의 관계

Fig. 6은 응력비와 하한계 응력확대계수와의 관계를 도시하였다. 피로균열진전이 정지되는 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 는 응력비가 증가함에 따라 감소되었다. 이와 같이 응력비가 감소할수록 하한계응력확대계수가 커지고 있는 현상을 고찰한 결과 하한계응력확대계수는 응력비의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

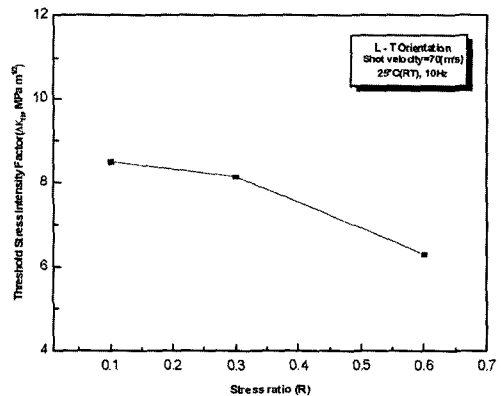


Fig. 6. Relation between threshold stress intensity factor range and stress ratio R

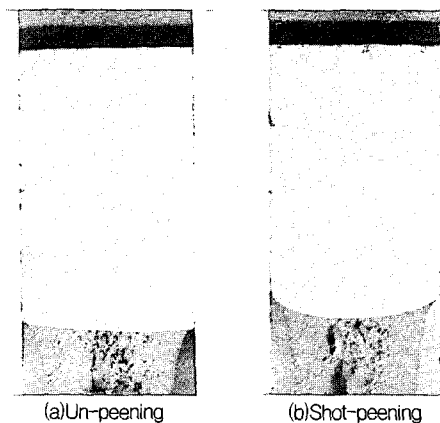


Fig. 7. Photographs of fracture surface

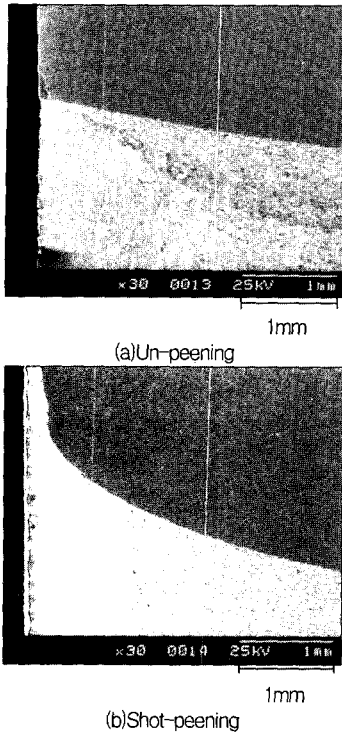


Fig. 8. SEM Photographs of fracture surface

3.5. 파단면의 특성

Fig. 7은 피로크랙진전과 파면의 실물사진이며 Fig. 8은 언피닝(a)과 쇼트피닝(b)시험편의 피로 크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 쇼트피닝 가공된 파단면 양쪽 측면의 피로 균열이 지연되어 전체적으로 라운드형으로 균열이 진전됨을 확인 할 수 있다. 이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 극부표면에 형성된 압축잔류응력에 의해 외부에서 인장압축력이 반복적으로 작용하여 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 작용하여 피로균열진전 속도 da/dN 이 지연되고 있는 것으로 판단된다.

4. 결론

쇼트피닝 가공한 스프링강(JISG SUP-9)의 압축잔류응력이 피로균열 진전거동에 미치는 영향을 조사 하였으며 그 결과는 다음과 같다.

1) 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 쇼트피닝재의 경우 피로균열전파속도 da/dN 과의 양대수 관계

가 직선적으로 증가하고 있으며 응력비가 증가함에 따라 da/dN 도 증가하고 있음을 알 수 있었다.

2) 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력이 $R=0.3$ 이하의 응력비에서는 피로균열진전에 대한 구속력이 강하게 미치고 있지만, $R=0.3$ 이상의 응력비에서는 압축잔류응력의 구속이 감소되었다.

3) 피로균열진전 파단면의 양상관찰에서 언피닝재에 비해 쇼트피닝재가 압축잔류응력이 피로균열선단 소성역내의 탄소성변형기구에 작용하여 피로균열진전이 억제된다.

4) 쇼트피닝 가공재의 경우에 언피닝재 보다 각 응력비에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 극 표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단을 구속하기 때문으로 판단된다.

참고문헌

- 1) O. Murakami, "A Guide of Fracuure Mechanics", O-Mu Company, pp. 121~127, 1979.
- 2) S. G. Jung, S. H. Lee, "A Guide of Shot peening Processing", SeHwa Pub, pp. 6~12, 2001.
- 3) R. D. Gillespie, "Its Effect on process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Oxford, pp. 81~91, 1993.
- 4) H. Wohlfahrt, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress", Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Chicago, pp. 316~331, 1984.
- 5) ASTM : E647-93, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1993.
- 6) A. Tange, N. Takamura, "Relation Between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Tokyo, pp. 243~253, 1990.
- 7) ASTM Standard, E647-95a, 1997.
- 8) Y. Kitsunai, "Fatigue Crack Growth Behavior in Mild Steel Weldments at Low Temperature", ASTM STP 857, pp. 280~290, 1991.
- 9) K. D. Park, C. G. Jung, "The Effect of Compressive Rrsidual Stresses of Two-stage Shot Peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel", Transactions of KSAE, Vol. 11, No. 1, pp. 185~192, 2003.