

스프링강의 피로크랙 진전거동에 미치는 압축잔류응력의 영향

박경동* · 정찬기*

(2002년 7월 23일 접수, 2002년 11월 28일 심사완료)

A Study on The Effect of Compressive Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Behavior of Spring Steel

Keyoung-Dong Park and Chan-Gi Jung

Key Words: Spring Steel(스프링강), Shot-peening(쇼트피닝), Over Peening(오버피닝), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Fatigue Crack Propagation(피로균열진전), Striation(스트라이에이션)

Abstract

In this paper, the effect of the compressive residual stresses which were obtained under the various shot velocities of shot balls on the fatigue behaviors of a spring steel, were investigated. The examination of CT specimen test were executed with the materials(JISG SUP9) which are being commonly used for the springs of automotive vehicles. As a result, the optimal shot velocity of shot balls were acquired considering the peak values of the compressive residual stresses on the surface of specimen and effect on the speed of the fatigue crack propagation da/dN in stage II and the threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in stage I. Also the material constant C and the crack propagation index m in the formula of paris law $da/dN = C (\Delta K)^m$ were suggested in this work to estimate the dependency on the shot velocity.

1. 서론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 철강소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료절감과 연료절감이라는 이점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동

조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현상이 발생된다. 이와 같이 금속에서 발생하는 피로 파괴 현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된 산업기술사회에 피로파괴 방지기술⁽¹⁾은 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

Wohlfahrt⁽²⁾는 금속의 표면처리에 의한 피로강도 향상 방법 중 쇼트피닝에 의한 표면의 압축잔류응력은 표면에서 최대값이 형성되는 것이 아니고 표면아래에서 최대값을 형성하여 쇼트피닝가공조건에 따라 압축잔류응력은 변화된다고 발표하였다. Zimmerli⁽³⁾는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 발표하였다. 쇼트피닝가

* 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부

E-mail : cgjung@dwku.com

TEL : (055)269-8505 FAX : (055)282-2923

** 회원, 부경대학교 대학원

공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시키므로 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜어 피로수명을 향상하기 위한 연구⁽⁴⁾가 활발하게 이루어지고 있다. 특히 압축잔류응력은 금속의 극표면부에 형성되고 압축잔류응력치가 높게 형성될수록 피로수명이 증가되며, 압축잔류응력은 상온에 비하여 주위온도가 증가할수록 압축잔류응력치가 감소되어 피로수명이연효과가 감소된다는 것을 Ozone과 Hijikata⁽⁵⁾가 발표하였다.

본 연구에서는 자동차환가장치에 사용되는 스프링강의 표면을 투사속도별(57, 70, 83, 96 m/sec)로 쇼트피닝가공하여 형성된 압축잔류응력이 상온환경에서 피로균열진전속도 da/dN , 응력 확대계수범위 ΔK , 하한계응력확대계수 ΔK_m 를 실험적으로 규명하고 중간속도영역(Stage II)에서 패리스식(Paris Law)⁽⁶⁾ $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 재료상수 C 와 피로균열진전지수 m 값에 대한 직선식을 제안하였다. 그리고 압축잔류응력이 형성된 극표면부의 피로균열진전과단면에 대한 균열진전기구를 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하여 부품설계시 압축잔류응력을 고려한 허용응력범위와 피로한도를 예측하여 설계자의 최적설계에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치와 선박엔진밸브스프링에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 1에 표시하였고, Table 2는 시험편 재료의 기계적 성질로서 Fig. 1과 같은 조건에서 열처리(Quenching & Tempering)한 후의 결과이다. 기계적 성질을 시험하기 위한 인장시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 12.5mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 프래바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig. 1과 같은 조

건으로 970℃에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490℃에서 80분간 뜨임하였다. 정상적인 소르바이트 조직의 확인은 금속 현미경(Versmet-2)에서 400배로 확대한 현미경 조직사진에 의하여 관찰되었다. 그리고, 열처리된 시험편은 ASTM-95a 규정에 따라 가공하였고, 노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 2와 같다.

2.2 시험편의 압축잔류응력 부여

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편은 고속회전 터어빈식 쇼트피닝기로 Table 3과 같이 임페라의 회전속도를 변화시켜 쇼트볼투사속도를 각각 57, 70, 83, 96m/sec으로 조정하여 시험편의 표면에 압축잔류응력을 부여하였다.

2.3 실험방법

완성된 CT시험편의 피로진전실험은 전기유압 서어보피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중계어방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 적용응력비는 $R=0.3$, 주파수는 10Hz로 하였으며 피로균열 길이측정은 크립게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온환경에서 실험하였다. Fig. 3은 실험장치의 구성도이다. 시험편의 초기균열은 응력확대계수 범위 ΔK 를 $10MPa\sqrt{m}$ 로 하여 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기균열진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 저감법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수범위 ΔK 의 계산식⁽⁷⁾은 식 (1)과 같다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P \sqrt{a}}{BW} \left\{ 29.6 - 185.5 \left(\frac{a}{W} \right) + 655.7 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 1017.0 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 638.9 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right\} \quad (1)$$

여기서 ΔP 는 하중범위, a 는 하중중심에서의 균열길이, B 는 시험편의 두께, W 는 하중중심에서의 시험편 길이가 된다.

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)	Elongation (%)
		after Quenching	after Tempering		
JISG SUP-9	1226	55	47	1079	9

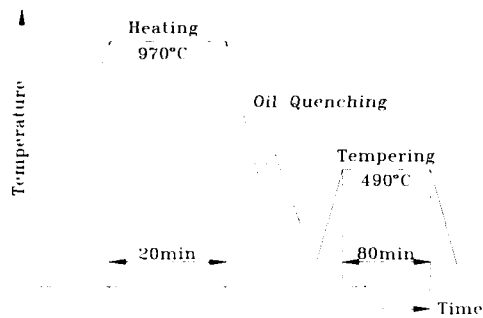


Fig. 1 Condition of Heat-treatment

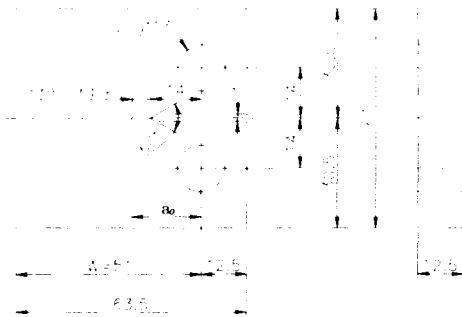


Fig. 2 Dimension of CT-Specimen

Table 3 Condition of Shot-peening

Specimen	Impeller Diameter [mm]	Shot Velocity		Shot Ball Diameter [mm]	Arc-Height [mm]
		[m/sec]	[rpm]		
A	-	-	-	-	-
B	490	57	1800	0.8	0.32
C	490	70	2200	0.8	0.39
D	490	83	2600	0.8	0.42
E	490	96	3000	0.8	0.46

Table 4 Measuring Condition of Residual Stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
Voltage	30kV	
Current	10mA	
θ	0°, 15°, 30°, 45	
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

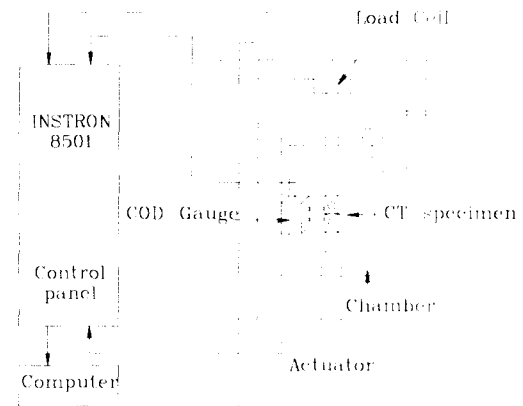


Fig. 3 Schematic Diagram of Fatigue testing machine

CT시험편의 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력의 측정은 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKN-MASF2M)로 Table 4와 같은 조건하에서 계산방법 $2\theta - \sin^2\phi$ 법을 적용하였다. 압축잔류응력의 깊이별 조사는 표면으로부터 20~30 μ m 깊이단위로 300~350 μ m 깊이까지 측정하였다.

그리고, 피로균열 진전과단면의 양상은 주사식전자 현미경(SEM, HITACHI S-2150)으로 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 분포

Fig. 4는 쇼트피닝 임페라 속도를 변화시켜 쇼트볼을 시험편 표면에 투사하여 얻어진 압축잔류응력치를 깊이별로 조사한 그래프로서 57m/sec에서 압축잔류응력의 최대치가 깊이 120 μ m로 조사되었고, 70m/sec에서는 150 μ m, 83m/sec는 180 μ m,

96m/sec는 200 μ m로서 쇼트볼의 투사속도를 높여 줄수록 압축잔류응력의 최대치가 깊게 형성되고 있으나 극표면의 압축잔류응력치는 투사속도의 가속에 따라 증가하여 투사속도 70m/sec에서 최대치를 보여주고 있고 투사속도 70m/sec이상으로 가속할 경우에는 점차 감소하였다. 이 현상은 투사속도를 가속할수록 피가공물 표면에 형성되는 투사에너지가 증가하여 발생하는 오버피닝(Over Peening)현상으로 판단되었다. Verpoort와 Gerdes⁽⁸⁾는 이러한 문제점을 지적하고 있다.

3.2 피로크랙 진전거동

Fig. 5는 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열진전속도와와의 관계이며 그림에서 R 은 응력비 $R = P_{min}/P_{max}$ 가 된다. 피로균열진전곡선에서 직선부분 중간속도영역(Stage II)이고, 수직선은 피로균열진전이 정지되는 하한계응력확대계수범위가 되며, 여기서 중간속도영역은 식 (2)와 같다.

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (2)$$

여기서 C 는 재료상수이며 m 은 피로균열진전지수가 된다. 중간속도영역에서 응력확대계수범위와 재료상수 C , 피로균열진전지수 m 의 결과는 Table 5와 같다. 응력확대계수 $\Delta K = 10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 언피닝(Un-peening)의 경우 $da/dN = 8.595 \times 10^{-6}$, 쇼트피닝(Shot-peening, velocity = 70m/sec)의 경우는 $da/dN = 4.758 \times 10^{-6}$ 으로서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향으로 1.8배의 지연효과가 있었고 오버피닝(Over Peening, velocity = 96m/sec)의 경우는 $da/dN = 5.731 \times 10^{-6}$ 으로서 17%감소한 1.5배의 지연효과가 있었다. 이 현상은 오버피닝에 의한 압축잔류응력의 형성이 극표면부에서 100MPa 정도 소멸되므로써 피로균열진전속도지연이 감소되는 결과로 판단되어진다.

Fig. 6은 크랙진전길이와 하중가진 횟수의 관계 그래프이며 크랙길이 28mm지점에서 하중가진횟수는 언피닝의 경우 $N = 619,824$ 회, 쇼트피닝의 경우 $N = 1,222,120$ 회로서 약 2배의 피로수명 향상이 있었고, 오버피닝 96m/sec의 경우 $N = 961,590$ 회로서 쇼트피닝 70m/sec 경우보다 20% 감소된 1.6배의 피로수명 향상 결과를 보여주고 있다.

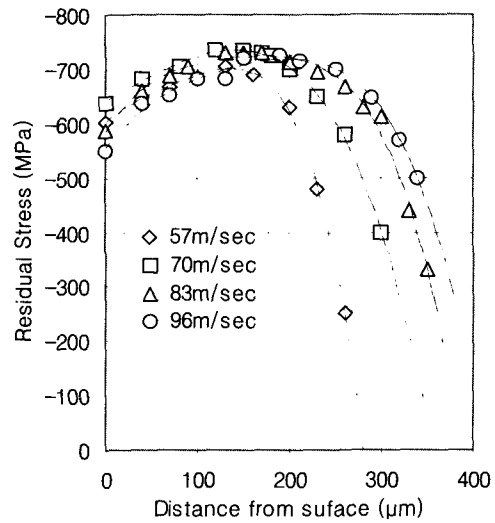


Fig. 4 Compressive Residual Stress Distributions Produced by Shot-Peening

Table 5 Experimental Constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the Fatigue Crack Growth

	ΔK Range (MPa \sqrt{m})	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
Un-peening	7.42	4.305×10^{-6}	2.592	2.21×10^{-3}
	$\leq \Delta K$	$\leq da/dN$		
57m/sec	≤ 17.91	$\leq 4.057 \times 10^{-5}$	3.555	1.31×10^{-10}
	$\leq \Delta K$	$\leq da/dN$		
70m/sec	≤ 17.61	$\leq 3.531 \times 10^{-5}$	3.772	6.83×10^{-10}
	$\leq \Delta K$	$\leq da/dN$		
83m/sec	8.65	3.824×10^{-6}	3.547	1.16×10^{-10}
	≤ 17.22	$\leq 3.41 \times 10^{-5}$		
96m/sec	8.71	3.853×10^{-6}	3.351	2.01×10^{-9}
	≤ 16.77	$\leq 3.12 \times 10^{-5}$		
96m/sec	8.75	3.89×10^{-6}	3.351	2.01×10^{-9}
	≤ 16.43	$\leq 2.65 \times 10^{-5}$		

3.3 C 와 m 의 투사속도 의존성

Fig. 7은 C 와 m 의 관계 그래프이고, Fig. 8은 C 와 m 값의 투사속도 의존성을 보여주고 있으며, 재료상수 C 의 값은 투사속도 0~70m/sec범위에서 점차 감소하였고 투사속도 70~96m/sec범위에

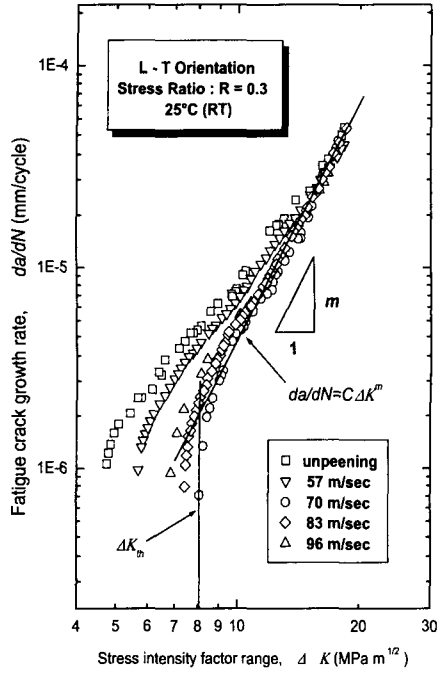


Fig. 5 Relation between Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factor Range

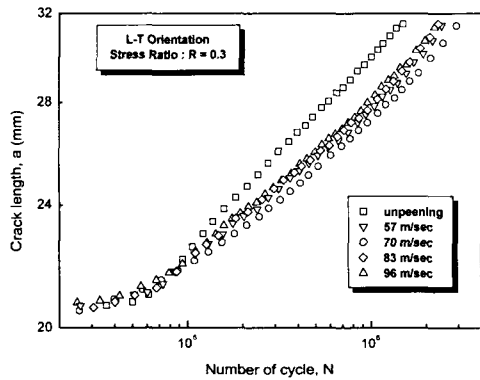


Fig. 6 Relation between Crack Length and Number of Cycle

서는 시험편 극표면의 압축잔류응력치 감소로 인한 증가현상을 보여주고 있다. 피로균열진전지수 m 역시 0~70m/sec까지는 증가하고 있으나 70m/sec를 기점으로 하여 감소되었다.

따라서 식 (2)와 같은 중간속도 영역을 결정하는 패리스식(Paris Law)의 C 와 m 에서 투사속도 v 의 의존성이 다음과 같이 제안되었다.

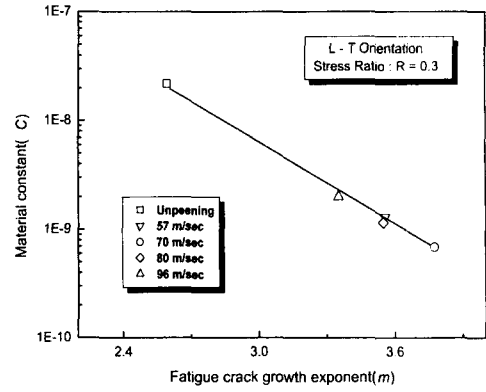


Fig. 7 Correlation between C and m in Paris Law $da/dN = C\Delta K^m$

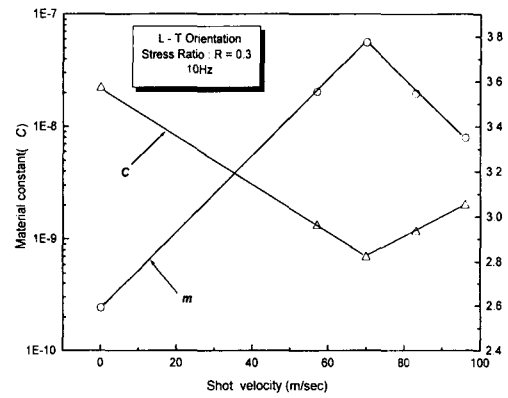


Fig. 8 Relation between Dependence on Shot Velocity and C, m in Paris Law $da/dN = C\Delta K^m$

투사속도의존성에서 재료상수 C 는

$$C = 2.199 \times 10^{-8} \times 0.9517^v \quad (3)$$

$70 \leq v \leq 96$ 일 때

$$C = 3.915 \times 10^{-11} \times 0.9599^v \quad (4)$$

투사속도 의존성에서 피로균열진전지수 m 은

$0 < v \leq 70$ 일 때

$$m = 2.59206 + 0.01689v \quad (5)$$

$70 \leq v \leq 96$ 일 때

$$m = 4.90768 - 0.01627v \quad (6)$$

3.4 피로크랙 진전파면의 양상

Photo. 1은 언피닝 시편의 상온실험 파단면과 쇼트피닝가공한 시편의 상온실험 파단면의 실물 사진이다. Photo. 2, 3은 시편의 피로균열진전 파단면의 표면부를 30배로 확대한 주사식전자현미경(SEM)사진이다.

여기서, Photo. 2는 압축잔류응력이 형성되지 않은 언피닝 시편에 대한 상온실험 파단면의 표면부 사진이며 피로균열진전 과정에서 압축잔류응력이 형성되지 않아 균열선단 소성영역의 소성변형구속력이 전혀 작용되지 않은 현상으로 파단면의 피로균열진전기구가 표면까지 직선으로 형성되었고, Photo. 3은 쇼트피닝가공된 시편을 상온실험한 파단면으로서 피로균열진전기구가 시편 중심부에서 표면부까지 완만한 곡선을 이루면서 곡선이 극표면부에 형성된 압축잔류응력의 영향으로 인하여 극표면부를 따라 늘어져 있는 현상이 거시적으로 관찰되었다. 이 현상은 극표면부에 형성된 압축잔류응력에 의하여 인장압축 반복작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력이 피로균열진전기구에 작용하여 피로균열진전속도 da/dN 가 지연되고 있다는 것이 관찰되었다.

Fig. 9, 10은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM사진촬영지점이고, Photo. 4, 5는 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각 지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전과정에서 Fig. 11과 같이 균열선단 소성영역의 피로균열진전기구인 스트라이에이션(Striation) 형성방향이 시편 중심부와 표면부에서 현저한 차이가 있다는 것이 관찰되었다.

4. 결론

스프링강(JISG SUP-9)의 표면을 투사속도별(0, 57, 70, 83, 96m/sec)로 쇼트피닝가공하여 형성된 압축잔류응력이 상온상태에서 피로균열진전특성에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 투사속도 가속에 따라 압축잔류응력의 최대치 형성깊이는 증가하지만 극표면의 압축잔류응력치는 투사속도 70m/sec를 기점으로 최대치가

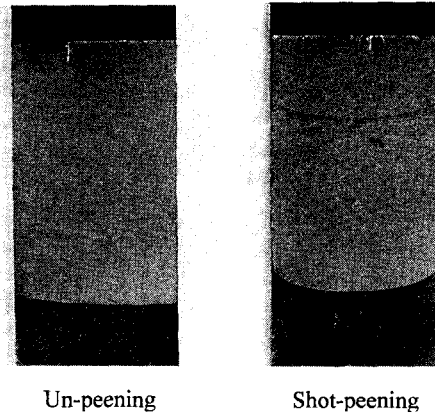


Photo. 1 Photographs of Fracture Surface

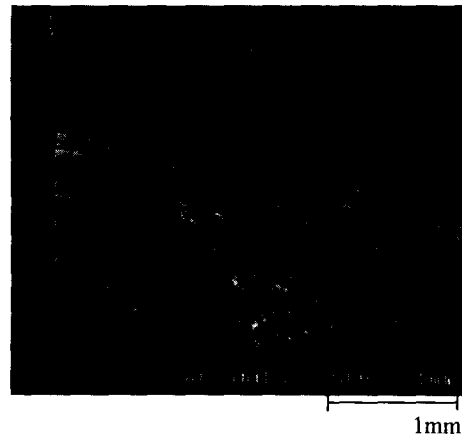


Photo. 2 SEM Photographs of Fracture Surface for Un-peening

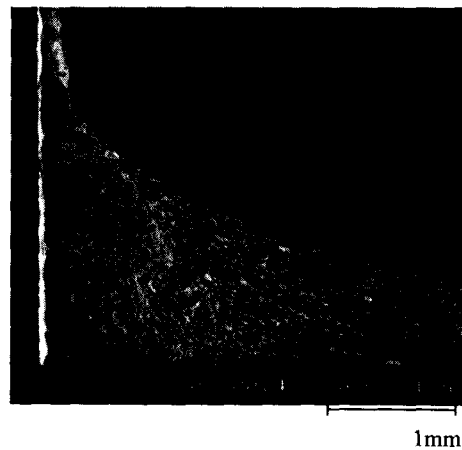


Photo. 3 SEM Photographs of Fracture Surface for Shot-peening

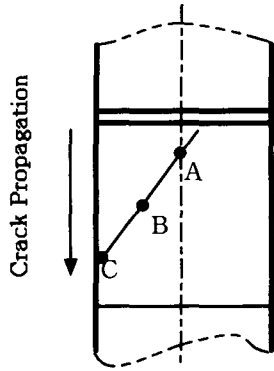


Fig. 9 Picture Point of Fracture Surface for Un-peening

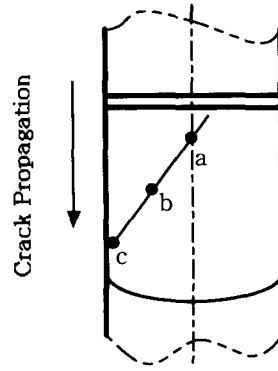


Fig. 10 Picture Point of Fracture Surface for Shot-peening

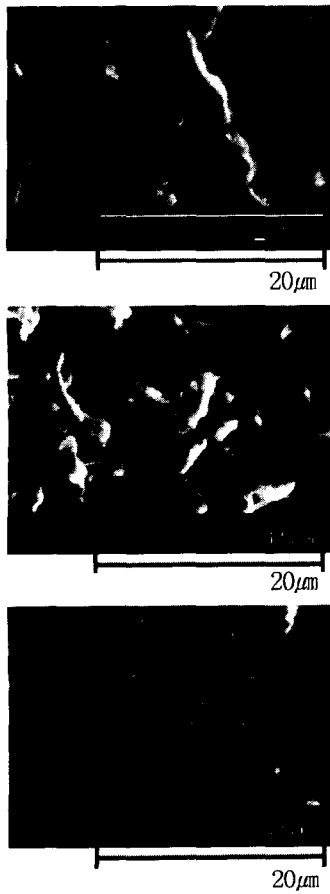


Photo. 4 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Un-peening)

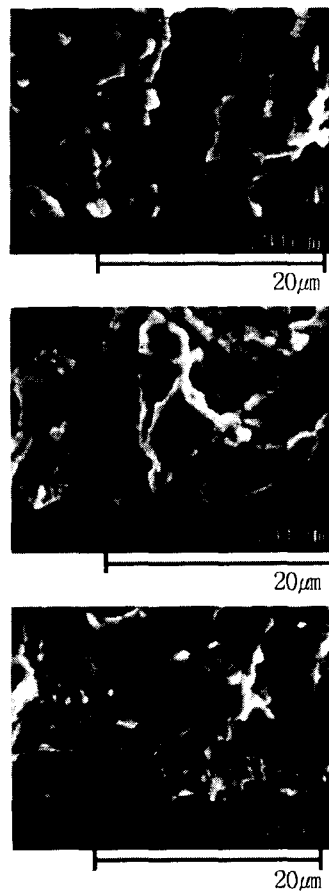


Photo. 5 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Shot-peening)

참고문헌

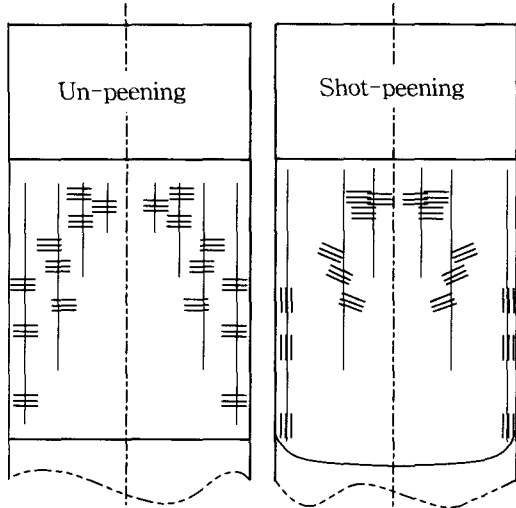


Fig. 11 Striation of Fatigue Crack Propagation

형성되고 투사속도를 70m/sec 이상으로 가속할 경우에는 감소된다.

(2) Stage II영역에서 피로균열진전속도 da/dN 는 투사속도의 가속에 따른 지연효과가 투사속도 70m/sec를 기점으로 최대치를 이루고 그 이상의 투사가속에서는 지연효과가 점차 저하된다.

(3) Stage I영역에서 하한계응력확대계수범위 ΔK_m 는 투사속도변화에 따라 압축잔류응력 영향이 크다.

(4) Paris Law $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에서 C 와 m 에 대한 투사속도 의존성이 식 (3), (4), (5), (6) 과 같이 제안되었다.

(5) 피로크랙진전 파면을 주사식 전자현미경 (SEM)으로 관찰한 결과 언피닝된 스프링강의 파면과 쇼트피닝된 스프링강의 파면 양상은 스트라이에이션(Striation)방향 형성과정에서 현저한 차이가 있다.

- (1) Park, K. D. and Jung, C. G., 2001, "The Effect of Compressive Residual Stresses on Fatigue Strength in DIN50CrV4-SAE9254 Steel," *Transaction of KCORE*, Vol. 15, No. 3, pp.93~99.
- (2) Wohlfahrt, H., 1984, "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.
- (3) Zimmerli, F. P., 1952, "Heat Treating, Setting and Shot Peening of Mechanical Springs," *Metal Progress*, Vol. 67, No. 6, pp. 97~106.
- (4) Cheong, S. K., Lee, S. H., and Chung, S. C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transaction of KSME, A*, Vol. 25, No. 10, pp.1590~1596
- (5) Ozone, T. and Hijikata, N., 1988, "Effect of Processes on Rotating Bending Fatigue Strength of Si-Cr Valve Spring Wire," *Transactions of Japan Society for Spring Research* Vol. 33, pp. 53~58.
- (6) Paris, P. and Erdogan, F., 1963, "A Critical analysis of crack Propagation Laws", *J. Basic Eng.*, Trans, ASME, pp. 528~534.
- (7) Tange, A. and Takamura, N., 1990, "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.
- (8) Verpoort, C. M. and Gerdes, C., 1989, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, Vol. 1, France, pp. 11~70.