

차량용 스프링강의 피로수명에 미치는 압축잔류응력의 영향

박경동* · 정찬기**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원

The Effect of Compressive Residual Stress on The Fatigue life in Spring Steel for vehicles

KEYOUNG-DONG PARK* AND CHAN-GI JUNG**

*Pukyong National University Mechanical Engineering

**Pukyong National University graduated school

KEY WORDS: Spring Steel 스프링강, Shot-peening 쇼트피닝, Over Shot-peening 오버쇼트피닝, Compressive Residual Stress 압축잔류응력, Fatigue Crack Propagation 피로균열진전, Striation 스트라이에이션

ABSTRACT: Nowadays, many components used in machinery industry is required lightness and high strength. Therefore, the effects of compressive residual stress by shot-peening which is method to improve fatigue lift of spring steel (JISG SUP-9), which used in suspension of automobile, on fatigue crack growth characteristics was investigated with considering fracture mechanics. So, we can obtain followings

1. The fatigue crack growth rate on stage II is conspicuous with the size of compressive residual stress and is dependent on Paris equation.
2. Although the maximum compressive residual stress is deeply and widely formed from surface, fatigue life does not improve than when maximum compressive residual stress is formed in surface.
3. The threshold stress intensity factor range is increased with increasing compressive residual stress.
4. In fracture surface of fatigue crack growth it is investigated that compressive residual stress remarkably retards fatigue crack growth.

1. 서 론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 철강(금속)소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다. 특히 철강소재 분야에서 대체 재질 개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있지만 생산성과 같은 경제적인 측면과 환경보호 측면에서 많은 문제점을 갖고 있으므로 그것에 상응하는 소재개발은 매우 중요한 사항이 되고 있다.

부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화(고응력화)는 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료 절감과 고출력화(연료절감)이라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현상이 발생된다.(村上と大南 1979)

이와 같이 금속에서 발생하는 피로 파괴 현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화 된 산업 기술사회에 피로파괴 방지 기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

금속의 표면처리에 의한 피로강도 향상 방법중 쇼트피닝에 의한 표면의 압축잔류응력 부여 방법은 1927년에 E.G.Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시키어 금속표면의 경화등을 시험한 것을 시초로 하여 1935년에 Weibel이 엔진 밸브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시킨 결과를 발표하였고, 1940년에 F.P.Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하여 미국의 자동차와 항공부품업계에서 지속적으로 연구하고 실용화 하므로써 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다.(정성균과 이승호 2001)

쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시키어 피로수명을 향상하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.(Gillespie 1993)(Wohlfahrt 1984)

제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당동 부경대학교
051-620-1592 parkkd@mail.pknu.ac.kr

이러한 피로파괴는 대부분이 피로균열의 개시와 피로균열의 안정성장과정에서 소비되므로 피로균열의 개시와 안정성장과정의 해석과 예측이 매우 중요한 사항이 되고 있다. 균열의 개시와 균열의 성장과정은 반복하중, 부식환경, 고온환경, 저온환경하에서 균열의 개시조건과 균열의 전진속도를 특성 짓는 것이 파괴역학의 파라미터로서 피로균열 전파속도 da/dN 또는 da/dt (a : 균열길이, N : 외력의 반복수, t : 재하시간)가 K 또는 ΔK 의 함수로서 $da/dN = f(\Delta K, K)$, $da/dt = f(K)$ 에 의해 파괴조건이 기술되어지는 선형파괴역학이 응용되고 있으며 응력 확대계수 (K : Stress Intensity Fracture)와 파괴인성(K_{Ic} : Fracture Toughness) 중요한 파라미터이다

선형파괴역학(Liner Elastic Fracture Mechanics)은 1959년 Irwin에 의해 제정된 이래 매우 활발히 연구한 결과 새로운 학문체계로서 완성해 가고있다. 균열근방의 탄성응력장을 특성 짓는 파라미터 K 를 사용하여 식 $K \leq K_{Ic}/S$ 에 의해 취성파괴를 방지하는 조건을 기술하려는 입장이 소위 선형파괴역학이며 기본적으로 탄성해석에 의해 파괴조건이 기술되므로 균열선단 근방에 생긴 소성역이 균열이나 다른 부재 치수에 비하여 매우 작다는 소위 소규모항복범위(Small Scale Yielding)에서의 파괴문제에 대해 유효하다.(장동일 등 1998)

본 논문에서는 종래에 보고되지 않고 실험적으로 어려운 스프링강(JISG SUP-9)의 표면에 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력을 부여하여 압축잔류 응력별 피로균열전파특성을 조사하고 특히 압축잔류응력이 피로균열 안정성장구간과 하한계응력확대계수에 미치는 영향을 정식화하고 피로균열 전진 파면의 양상을 관찰한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 21에 표시하였고, Table 22는 시험편 재료의 기계적 성질로서 Fig 21과 같은 조건에서 열처리(Quenching & Tempering)한 후의 결과이며, 기계적 성질을 시험하기 위한 인장시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다.

피로균열 전진거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 13mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 프랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig 21과 같은 조건으로 970°C에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490°C에서 80분간 뜨임 하였으며, 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 22와 같다.

Table 2.1 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 2.2 Mechanical Properties of Specimen

Material	Tensile Strength	Hardness(HrC)		Yield Strength (MPa \sqrt{m})	Elongation (%)
		after Quenching	after Tempering		
JISG SUP-9	1226	55	47	1079	9

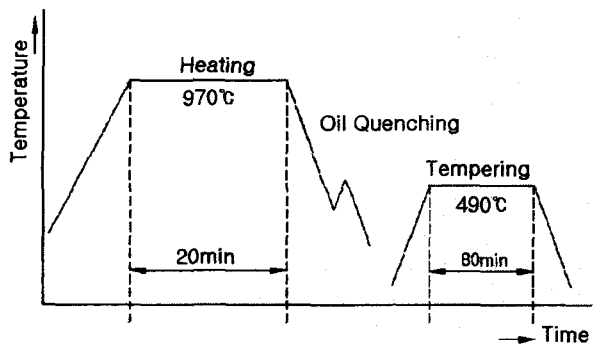


Fig 2.1 Condition of Heat-treatment

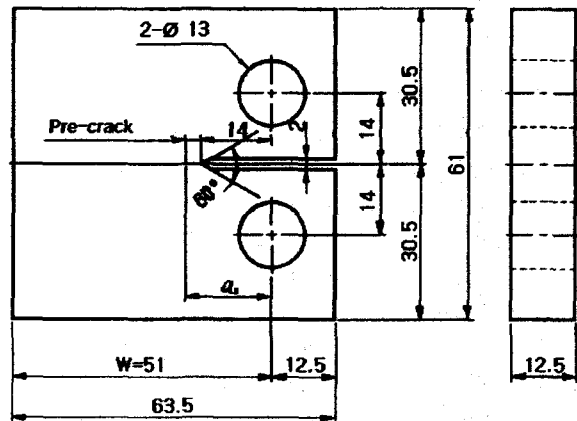


Fig 2.2 Dimension of CT-Specimen

2.2 시험편의 압축잔류응력 부여

21항과 같이 완성된 CT 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터어빈식 쇼트피닝기로 Table 2.3과 같은 쇼트피닝 조건 하에서 압축잔류응력의 크기가 각각 차이가 있는 4종류의 시험편을 완성하였다.

2.3 실험방법

완성된 CT 시험편의 피로진전실험은 전기유압서어보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 적용응력비 $R=0.3$ 주파수는 10 Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 크립게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온에서 실험하였다. Fig 2.3은 실험장치의 구성도이다.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 10MPa \sqrt{m} 로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 저감법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 식 (1)과 같다.(TAKAMURA)

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

여기서 ΔP 는 하중변위, a 는 하중중심에서의 균열길이, B 는 시험편의 두께, W 는 하중중심에서의 시험편길이 된다.

CT 시험편의 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 측정에는 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKN -MASF2M)로 Table 2.4와 같은 조건하에서 계산방법 $2\theta - \sin^2 \psi$ 법을 적용하였다. 압축잔류응력의 깊이별 조사는 표면으로부터 20~30 μm 깊이단위로 300~350 μm 깊이까지 측정하였다.

그리고, 피로균열 진전과 단면의 양상은 주사식 전자 현미경(SEM, HITACHI S-2150)으로 관찰하였다.

Table 2.3 Condition of Shot-Peening

Content	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
Impeller Diameter (mm)	∅490	∅490	∅490	∅490
Shot Velocity (rpm)	1800	2200	2600	3000
Shot Ball Diameter (mm)	∅0.8	∅0.8	∅0.8	∅0.8

Table 2.4 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	

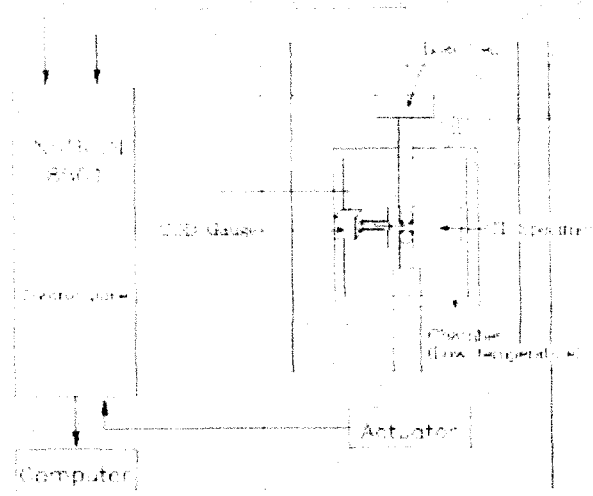


Fig 2.3 Schematic Diagram of low temperature Fatigue testing machine

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 분포

Fig 3.1은 쇼트피닝 임펠러 속도를 변화시켜 쇼트볼을 시험편 표면에 투사하여 얻어진 압축잔류응력치를 깊이별로 조사한 그래프로서 1800rpm에서 압축잔류응력의 최대치가 깊이 120 μm 로 조사되었고, 2200rpm에서는 150 μm , 2600rpm은 180 μm , 3000rpm은 200 μm 로서 쇼트볼의 투사속도를 높여줄수록 압축잔류응력의 최대치가 깊고 넓게 형성되고 있으나 표면의 압축잔류응력치는 투사속도를 높여주므로서 투사에너지가 너무 크기 때문에 발생하는 오버쇼트피닝 (Over Shot-peening) 현상으로서 Verpoort와 Gerdes의 논문에서는 이러한 문제점을 지적하고 있다.(Verpoort and Gerdes 1989)

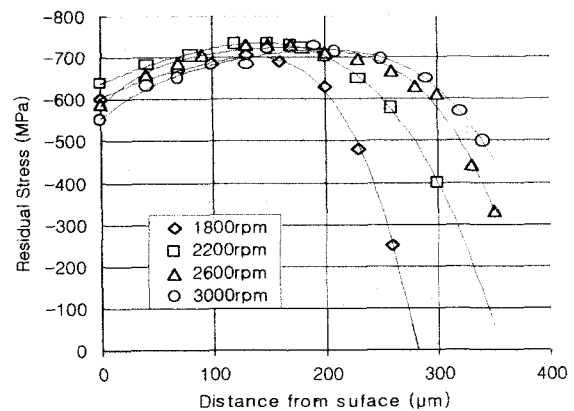


Fig. 3.1 Compressive Residual Stress Distributions Produced by Shot-Peening

3.2 피로크랙 진전거동

Fig 3.2는 응력확대계수 범위 ΔK 와 피로균열 진전속도와의 관계이며 그림에서 R 은 응력비 $R=P_{min}/P_{max}$ 가 된다. 피로균열 진전곡선에 직선부분이 중간속도영역(안정성장구간)과 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수범위가 되며, 여기서 중간속도영역은 식(2)와 같다.

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

여기서 C 는 재료상수이며 m 은 피로균열진전지수가 된다.(박경동 1983)(김재훈 1989)

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, rpm = 2200)의 경우는 $da/dN = 4.758 \times 10^{-6}$ 으로서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향으로 1.8배 감소되었으나, 오버쇼트피닝(Over Shot-peening, rpm = 3000)의 경우는 $da/dN = 5.731 \times 10^{-6}$ 으로서 1.5배가 감소되었다. 이 현상은 오버피닝에 의한 압축잔류응력의 형성이 극표면부에서 -100MPa 정도 감소되므로서 피로균열진전속도 지연이 감쇠되는 결과로 판단되어진다. 이러한 결과로 언피닝의 경우 하한계 응력 확대계수 $\Delta K_{th} = 4.7\text{MPa}$, 쇼트피닝 2200rpm의 경우 $\Delta K_{th} = 8\text{MPa}$, 쇼트피닝 3000rpm의 경우 $\Delta K_{th} = 6.9\text{MPa}$ 로 나타났다.

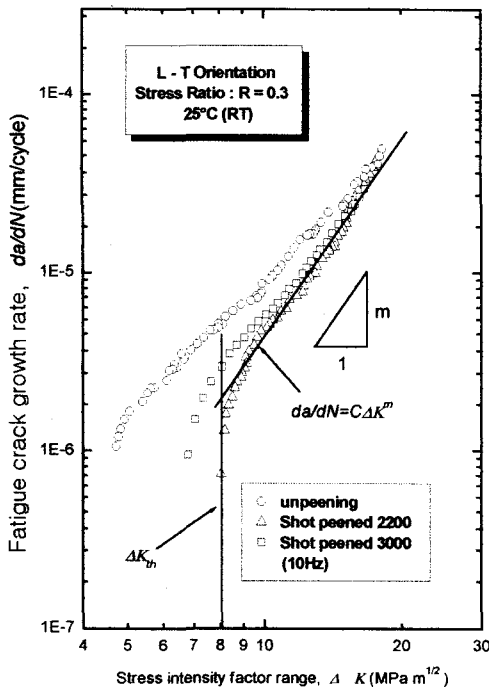


Fig 3.2 Relation between Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factor Range

3.3 쇼트피닝속도와 하한계 응력확대계수와의 관계

Fig 3.3에 쇼트피닝 임팩라 속도와 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 언피닝의 경우 ΔK_{th} 가 4.7MPa였으나 2200rpm에서 쇼트피닝한 경우 압

축잔류응력이 -720MPa로 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 가 8MPa로 나타났으며 3000rpm에서 쇼트피닝한 경우의 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 가 6.9MPa로 2200rpm에 비해 오히려 감소하였다. 이는 3000rpm의 경우 오버쇼트피닝의 영향으로 생각된다.

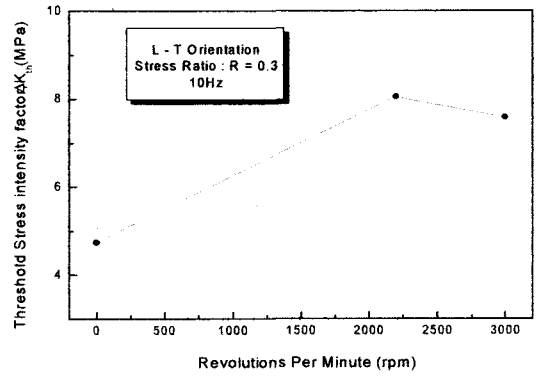


Fig 3.3 Relation between Threshold Stress intensity factor and Revolution Per Minute (rpm)

3.4 크랙성장지수와 쇼트피닝 속도와의 관계

피로크랙성장지수 m 와 쇼트피닝속도 rpm의 관계를 Fig3.4에 나타내었다. 그림에서 언피닝재료일 때 크랙성장지수 $m = 2.592$ 였으나 쇼트피닝속도 2200rpm에서 압축잔류응력이 -720MPa로 이 때 크랙진전지수 $m = 3.744$ 로 나타났으며 쇼트피닝 속도 3000rpm에서는 오히려 압축잔류응력이 조금 감소하는 경향으로 나타났으며 이로 인해 크랙진전지수 $m = 3.351$ 로 쇼트피닝속도 2200rpm에 비하여 크랙진전지수 $m = 0.423$ 이 감소하였다. 이는 역시 오버쇼트피닝으로 인하여 크랙진전지수가 감소하는 것으로 생각된다.

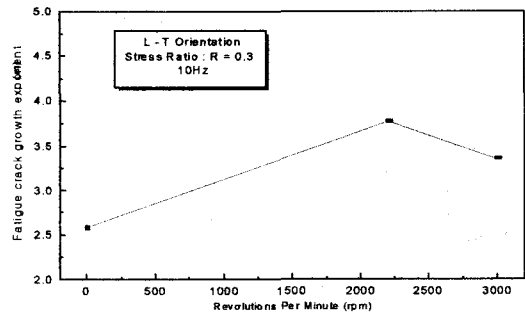


Fig 3.4 Relation between Fatigue Crack Growth Exponent and Revolutions Per Minute(rpm)

3.5 크랙진전길이와 사이클의 관계

크랙진전길이가 a 와 하중작용횟수 N 와의 관계를 Fig 3.5에 나타내었다. 그림에서 크랙길이가 22mm (하중작용횟수 10^5)까지는 완만하게 증가하다가 크랙길이가 22mm 이상부터는 하중작용횟수에 비하여 크랙길이가 급격하게 증가함을 나타내었다. 그리고 크랙길이가 22mm까지는 언피닝재와 2200rpm 및 3000rpm의 속도로 압축잔류응력을 준 경우와 크게 차이를 보이지 않았으나 크랙길이가 22mm 이상부터는 언피닝재와 하중작용횟수에 따른 쇼트피닝재와 차이를 나타내었다. 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 크랙길이가 급격히 증가함을 보였다.

2200rpm의 경우가 3000rpm 경우보다 크랙길이가 완만하게 증가함을 나타내었다. 이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력에 의해 소성영역을 구속하여 피로균열진전이 지연되는 현상으로 나타났다. 또 언피닝의 경우 크랙길이가 28mm 지점에서 하중작용횟수 $N = 619,824$ 회 였으나 2200rpm으로 쇼트피닝한 경우 하중작용횟수 $N = 1,222,120$ 회로 약 2배의 피로수명이 증가하였고, 3000rpm으로 쇼트피닝한 경우 하중작용횟수 $N = 961,590$ 회로 언피닝에 비해 1.6배의 피로 수명이 향상되었다. 그러나 3000rpm의 경우 2200rpm보다 피로수명 $N = 260,530$ 회 감소함을 보였다. 이는 오버쇼트피닝의 결과로 생각되어진다.

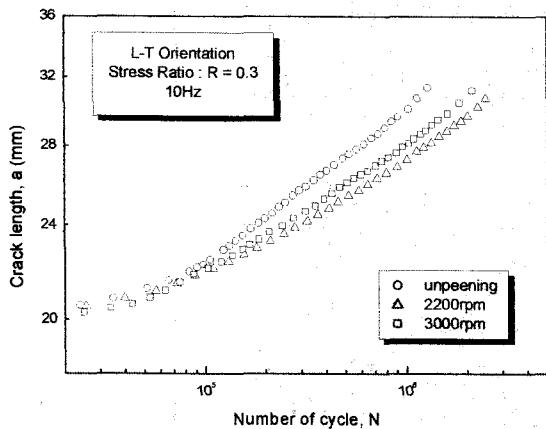


Fig 3.5 Relation between Crack Length and Number of Cycle

3.6 재료상수와 피로크랙진전지수 관계

(2)식에 의거 재료상수 C 와 피로크랙진전지수 m 관계를 Fig 3.6에 나타내었다. 그림에 의하면 재료상수 C 와 피로크랙진전지수의 관계에서 재료상수 C 의 경우 언피닝재가 가장 높은 값을 나타내었고 다음은 쇼트피닝 속도가 2200rpm, 그리고 쇼트피닝 속도가 3000rpm의 경우가 가장 낮았으며 피로크랙진전지수 m 의 경우 역으로 쇼트피닝 속도가 3000rpm의 경우가 가장 높고 다음은 2200rpm, 그리고 언피닝이 가장 낮은 값을 나타내었다.

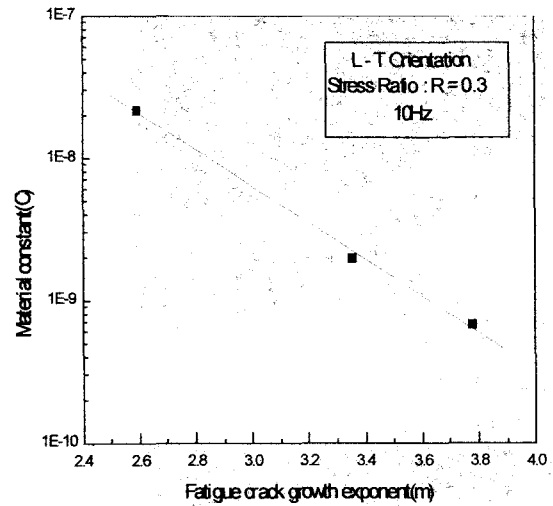


Fig 3.6 Correlation between C and m in Paris Law $da/dN = C \Delta K^m$

3.7 피로크랙 진전파면의 양상

Photo 3.1은 피로크랙진전 파면의 실물사진이고 Photo 3.2, Photo 3.3은 언피닝된 스프링강과 쇼트피닝된 스프링강의 피로크랙진전파면에 대한 30배 확대사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.

이 현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로서 피로균열진전이 지연되는 현상으로 관찰되었다.

Fig 3.7, 3.8는 파면의 사진촬영지점이고, Photo 3.4, 3.5는 파면의 각지점에 대한 파면양상이다. Fig 3.9은 파면의 양상을 관찰한 결과이며 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다. 이 현상은 쇼트피닝가공에 의하여 표면에 형성된 압축잔류응력이 피로균열 진전과정에 표면부의 균열선단 소성영역을 구속하므로서 피로크랙진전 지연현상이 관찰되었고, 이러한 현상은 파면의 스트라이에이션(Striation) 방향의 형성과정을 관찰하므로서 판명되었다.(Willenborg etc 1971)

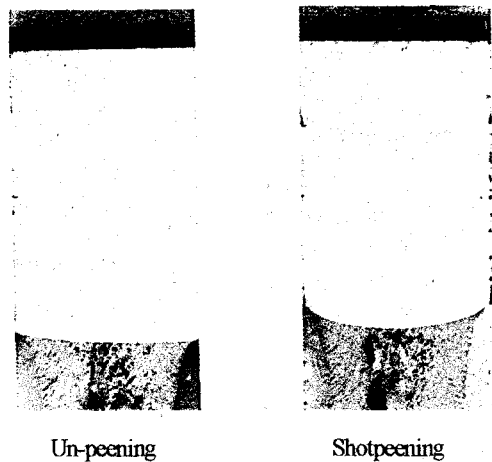


Photo 3.1 Photographs of Fracture Surface

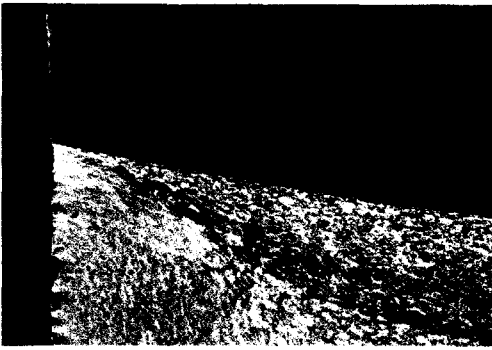


Photo 3.2 SEM Photographs of Fracture Surface Un-peening

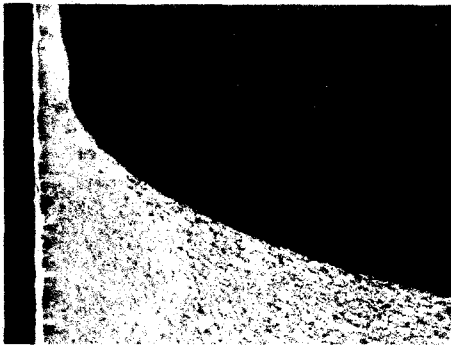


Photo 3.3 SEM Photographs of Fracture Surface Shot-peening

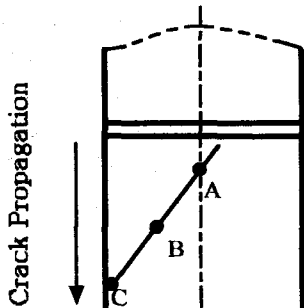


Fig 3.7 Picture Point of Fracture Surface on Un-peening

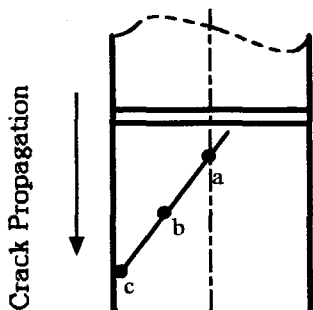


Fig 3.8 Picture Point of Fracture Surface on Shot-peening

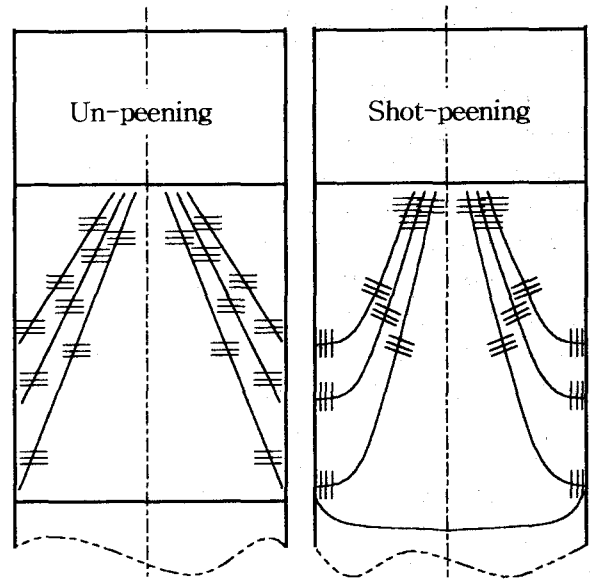


Fig 3.9 Striation of Fatigue Crack Propagation

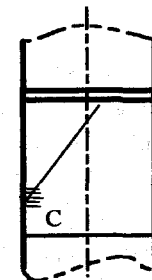
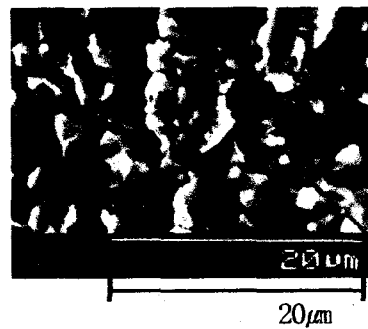
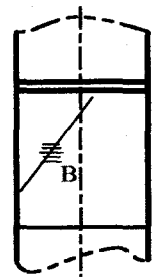
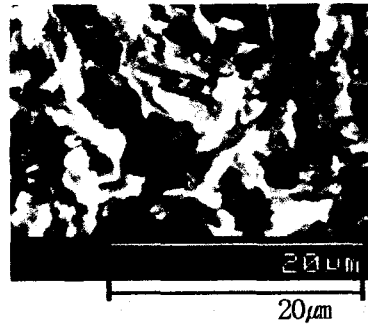
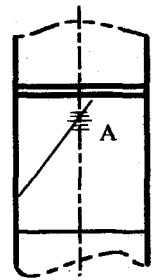
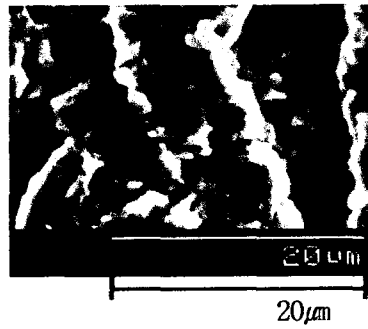


Photo 3.4 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Un-peening)

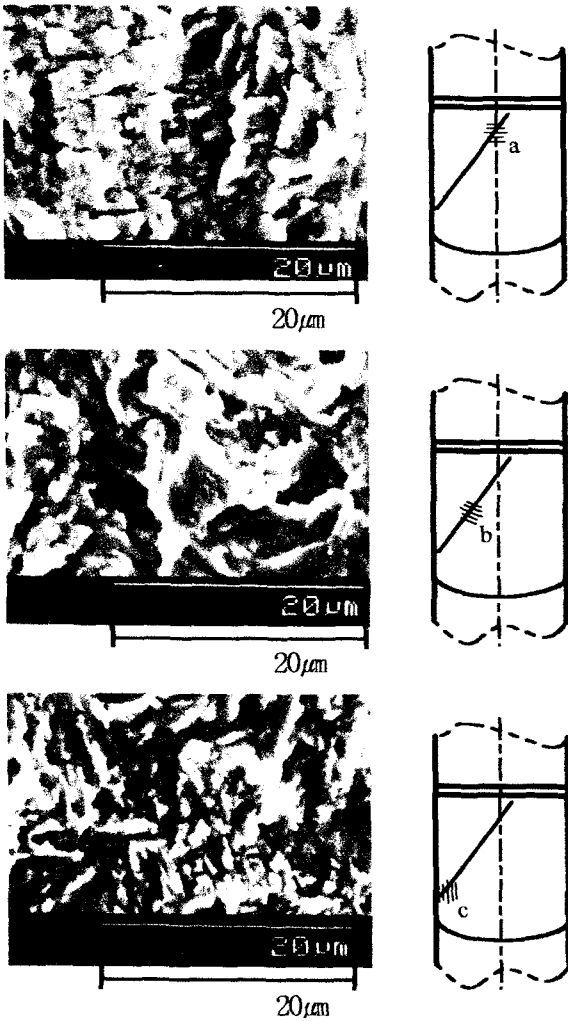


Photo 3.5 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Shot-peening)

4. 결 론

쇼트피닝가공된 스프링강(ISG SUP-9)의 압축잔응력이 피로균열진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 본 연구의 응력확대계수범위 $8 \sim 18\text{MPa}\sqrt{m}$ 에서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 피로균열진전 특성에서 영향이 크다.

(2) 언피닝(Un-peening)된 스프링강과 쇼트피닝(Shot-peening)된 스프링강의 피로균열 진전속도 da/dN 는 쇼트피닝된 스프링강이 1.8배 감소되었다.

(3) 쇼트피닝된 스프링강이 언피닝상태의 스프링강보다 피로크랙진전 피로수명이 2배 향상되었다.

(4) 쇼트피닝된 스프링강에서 오버쇼트피닝(Over Shot-peening, 3000rpm)된 스프링강은 본 연구의 정상 쇼트피닝(2200rpm)보다 피로크랙진전 피로수명이 20% 감소되

었다.

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

참 고 문 헌

- (1) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp10-16(1989)
- (2) 박경동, 原子爐用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙진전과 크랙 閉閉口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문 (1983)
- (3) 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학 원장출판사 pp12~13, 1998, Jan
- (4) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 가공개론 도서출판세화, pp 6~12. 2001,Jan(1) 村上, 大南 : 破壊力學 入門, オ-ム社,(1979), pp 121-127
- (5) 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
- (6) Gillespie, R. D., "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Oxford, pp.81~90, 1993.
- (7) Verpoort, C. M. and Gerdes, C., "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.1 1~70, 1989.
- (8) Willenborg, J., Engle, R. M. and Wood, H. A., 1971, "A Crack Growth Retardation Model Using and Effective Stress Concept," AFFDL-TM-71-1-FBR
- (9) Wohlfahrt, H., "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
- (10) 村上, 大南 : 破壊力學 入門, オ-ム社,(1979), pp 121-127