

차량용 스프링강의 피로균열진전에 미치는 압축잔류응력의 영향

박 경 동[†] · 하 경 준^{**} · 박 형 동^{**}

(원고접수일 : 2002년 8월 14일, 심사완료일 : 2002년 12월 4일)

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

Kyung-Dong Park[†] · Kyung-Jun Ha^{**} · Hyung-Dong Park^{**}

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. The shot-peening method is used in order to improve the fatigue life of spring steel(JIS G SUP-9) which is used in suspension of automobile. The compressive residual is induced in this shot-peening process. This paper investigated the effect of the residual compressive stress on the fatigue crack growth characteristics. Main results are summarized as follows.

1. The fatigue crack growth rate on stage II is conspicuous with the level of compressive residual stress and is dependent on Paris equation.
2. Although the maximum compressive residual stress is deeply and widely formed from surface, it does not improve the fatigue life comparing 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

요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 철강(고속)소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다.

기술산업에서 부품의 경량화는 소비자로부터

[†] 책임저자(부경대학교, 기계공학부), E-mail : Parkkd@Pknu.ac.kr, T : 051)620 - 1592
^{**} 부경대학교 기계공학과 박사과정

특히 철강소재 분야에서 대체 소재 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 실제시 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.^[11] 이와 같이 금속에서 발생하는 피로 파괴 현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 피로파괴방지 기술은 매우 중요하다.

금속의 표면처리에 의한 피로강도 향상 방법 중 쇼트피닝에 의한 표면의 압축잔류응력 부여 방법은 1927년에 E.G.Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 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.^[12]

쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상하기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.^[13-14]

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 진전속도를 특성 짓는 것이 중요하다.

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 Fractor)와 파괴인성(K_c : Fracture Toughness)이 중요한 파라미터이다

선형 파괴역학(Liner Elastic Fracture Mechanics)는 1959년 Irwin에 의해 제정된 이래 매우 활발히 연구한 결과 새로운 학문체계로서 완성해 가고 있다. 이는 균열근방의 탄성응력장을 특성 짓는 파라미터 K 를 사용하여 식 $K \leq K_c/S$ 에 의해 취성파괴를 방지하는 조건을 기술하려는 입장이 소위 선형파괴역학이다. 기본적으로 탄성해석에 의해 파괴조건이 기술되므로 균열선단근방에 생긴 소성역이 균열이나 다른 부재 치수에 비하여 매우 작다는 소위 소규모항복범위(Small Scale Yielding)에서의 파괴문제에 대해 유효하다.^[15]

본 논문에서는 종래에 보고되지 않고 실험적으로 어려운 차량 및 선박용스프링강(SUP 9)의 표면에 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력을 부여하여 압축잔류 응력별 피로균열전파특성을 조사함을 목적으로 하고 있다. 특히 압축잔류응력이 피로균열 안정성장구간과 하한계응력확대계수에 미치는 영향을 정식화하고 피로균열 진전 파면의 양상을 관찰한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(SUP 9)이며, 이 재료의 화학적 성분을 Table 2.1에 표시하였고, Table 2.2는 시험편 재

료의 기계적 성질로서 Fig 2.1과 같은 조건에서 열처리(Quenching & Tempering)한 후의 결과이며, 기계적 성질을 시험하기 위한 인장시험편은 KS B -084호로 가공하였다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 13mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 프렛바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig 2.1과 같은 조건으로 970°C에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490°C에서 80분간 뜨임

하여 열처리 하였다. 금속 현미경(Versmet-2)에서 400배로 확대한 현미경 조직사진에 의하여 정상적인 소르바이트 조직을 확인하였다.

그리고, 열처리된 시험편은 ASTM-95a 규정에 따라 가공하였고, 노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다. 시험편의 형상과 치수는 Fig 2.2와 같다.

2.2 시험편의 압축잔류응력 부여

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터빈식 쇼트피닝기로 Table 2.3과 같은 쇼트피닝 조건 하에서 4종류의 시험편을 완성하였다.

2.3 실험방법

완성된 CT 시험편의 피로균열진전실험은 전기유압서어보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중감소 제어방식으로 실험하였다. 적용 하중파형은 정현파로 하고 응력비 $R=0.3$, 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 크립게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온에서 실험하였다. Fig 2.3은 실험장치의 구성도이다.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위

Table 2.1 Chemical Composition of Specimen. (wt%)

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

Table 2.2 Mechanical Properties of Specimen.

Material	Tensile Strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
		after Quenching	after Tempering		
SUP-9	1226	55	47	1079	9

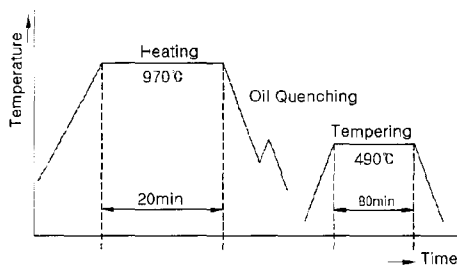


Fig 2.1 Condition of Heat-treatment.

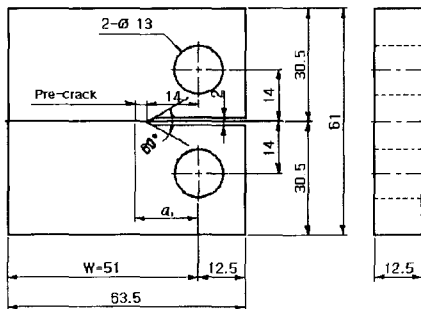


Fig 2.2 Dimension of CT-Specimen.

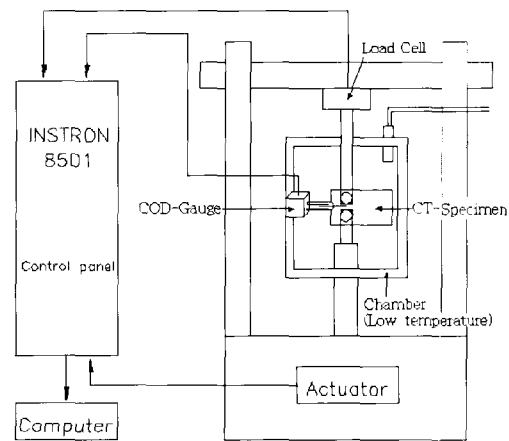


Fig 2.3 Schematic Diagram of Fatigue Testing Machine.

ΔK 를 $10\text{MPa}\sqrt{m}$ 로 하여 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기크랙진전 길이 3~5mm지점에서 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 시험편길이가 된다.

CT시험편의 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력의 측정은 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU - MSF2M)로 Table 2.4와 같은 조건하에서 계산방법 $2\theta\text{-sin}^2\phi$ 법을 적용하였다. 압축잔류응력의 깊이별 조사는 표면으로부터 20~30 μm 깊이단위로

300~350 μm 깊이까지 측정하였다.

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

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 있다. 하지만 표면의 압축잔류응력치는 3000rpm 보다 2200rpm에서 높게 나왔다. 이는 투사속도를 높혀주므로서 투사에너지가 너무 크기 때문에 발생하는 오버쇼트피닝(Over Shot-peening) 현상으로서 Verpoort와 Gerdes의 논문에서는 이러한 문제점을 지적하고 있다.^[6,7]

Table 2.3 Condition of Shot-Peening.

	shot	shot	shot	shot
Content	peened	peened	peened	peened
Impeller Diameter (mm)	1800	2200	2600	3000
Shot Velocity (rpm)	1800	2200	2600	3000
Shot Ball Diameter (mm)	$\phi 0.8$	$\phi 0.8$	$\phi 0.8$	$\phi 0.8$

Table 2.4 Measuring Condition of Residual Stress.

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

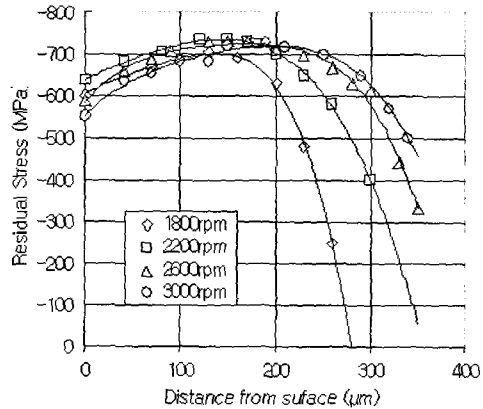


Fig. 3.1 Compressive Residual Stress Distributions Produced by Shot-Peening.

3.2 피로균열 진전거동

Fig 3.2는 응력확대계수 범위 ΔK 와 피로균열 진전속도와의 관계이며 그림에서 R 은 응력비

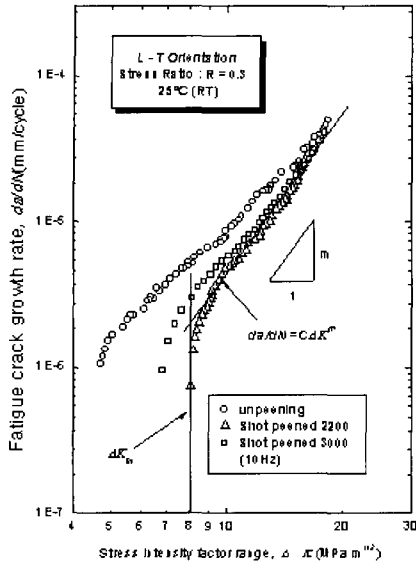


Fig. 3.2 Relation between Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factor Range.

$R=Pmin/Pmax$ 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.

응력확대계수 $\Delta K=10MPa \sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 언피닝(Un-peening)의 경우 $da/dN=8.595 \times 10^{-6}$, 쇼트피닝(Shot-peening 2200rpm)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.

3.3 쇼트피닝속도와 하한계 응력확대계수 관계

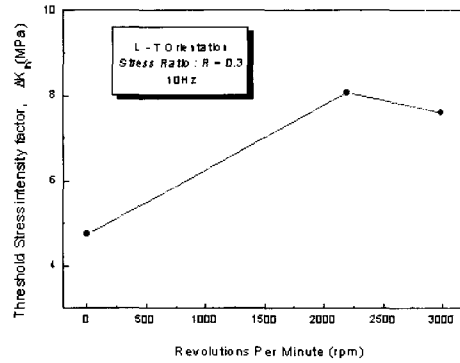


Fig. 3.3 Relation between Threshold Stress intensity factor range and Revolution Per Minute of impeller.

Fig. 3.3에 쇼트피닝 임페라 속도와 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 의 관계를 나타내었다. 그림에서 언피닝의 경우 ΔK_{th} 가 $4.7MPa m^{1/2}$ 였으나 2200rpm에서 쇼트피닝한 경우 압축잔류응력이 -720MPa로 하한계 응력 확대계수 ΔK_{th} 가 $8MPa m^{1/2}$ 로 나타났으며 3000rpm에서 쇼트피닝한 경우의 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 가 $6.9MPa m^{1/2}$ 로 2200rpm에 비해 오히려 감소하였다. 이는 3000rpm의 경우 오버쇼트피닝의 영향으로 생각된다.

3.4 균열성장지수와 쇼트피닝속도와의 관계

피로균열성장지수 m 와 쇼트피닝속도 rpm의 관계를 Fig.3.4에 나타내었다. 그림에서 언피닝재료

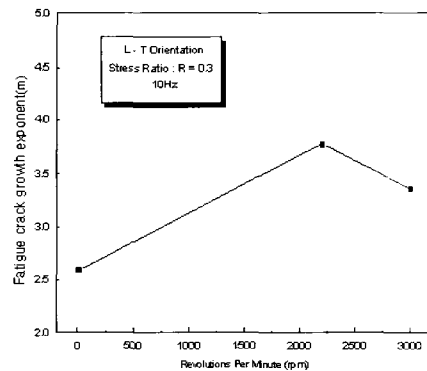


Fig. 3.4 Relation between Fatigue Crack Growth Exponent and Revolutions Per Minute of impeller.

일 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.

3.5 크랙진전길이의 사이클의 관계

크랙진전길이 a 와 하중작용횟수 N 와의 관계를 Fig 3.5에 나타내었다. 그림에서 크랙길이 22mm (하중작용횟수 10^6)까지는 완만하게 증가하다가 크랙길이 22mm 이상부터는 하중작용횟수에 비하여 크랙길이 급격하게 증가함을 나타내었다. 그리고 크랙길이 22mm까지는 언피닝재료와 2200rpm 및 3000rpm의 속도로 압축잔류응력을 준 경우와 크게 차이를 보이지 않았으나 크랙길이 22mm 이상부터는 언피닝재와 하중작용횟수에 따른 쇼트피닝재와 차이를 나타내었다. 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 크랙길이 급격히 증가함을 보였다.

2200rpm의 경우가 3000rpm 경우보다 크랙길이 완만하게 증가함을 나타내었다. 이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력에 의해 소성영역을 구속하여 피로균열진전이 지연되는 현상으로 나타났다. 또 언피닝의 경우 크랙길이 28mm 지점에서

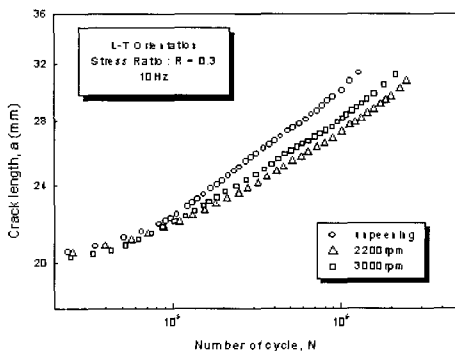


Fig. 3.5 Relation between Crack Length and Number of Cycle.

하중작용횟수 $N = 619,824$ 회 였으나 2200 rpm으로 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.

3.6 재료상수와 피로균열진전지수 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.

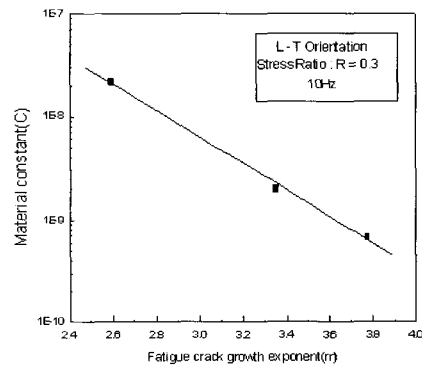


Fig. 3.6 Correlation between C and m in Paris Law $da/dN = C AK^m$.

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,

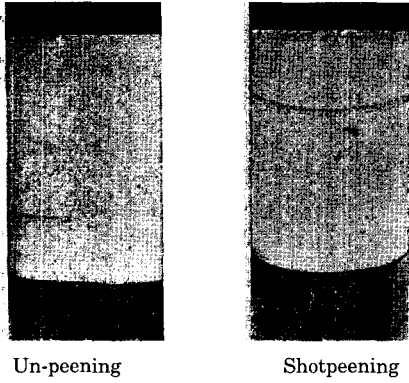


Photo 3.1 Photographs of Fracture Surface 1mm.

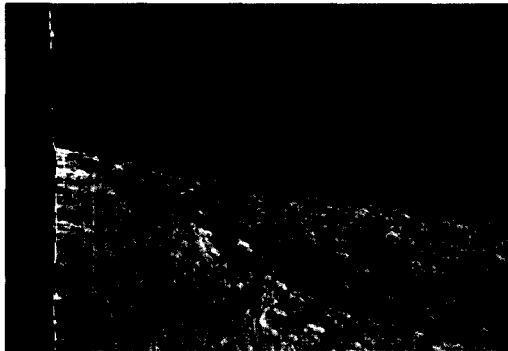


Photo 3.2 SEM Photographs of Fracture Surface Un-peening 1mm.

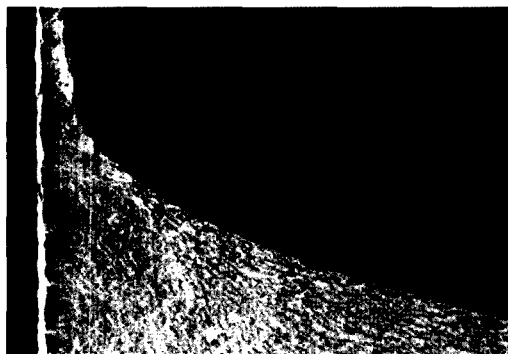


Photo 3.3 SEM Photographs of Fracture Surface Shot-peening.

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 피로균열진전과정에 표면부의 균열선단 소성영역을 구속하므로서 피로크랙진전 지연현상

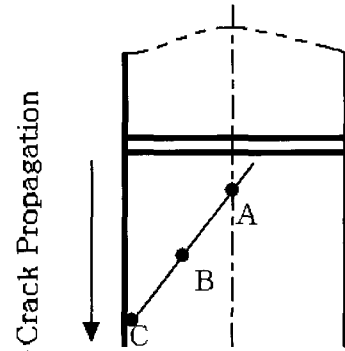


Fig 3.7 Picture Point of Fracture Surface on Un-peening.

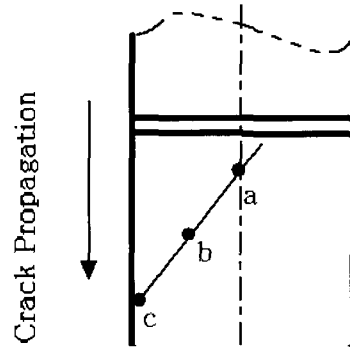


Fig 3.8 Picture Point of Fracture Surface on Shot-peening.

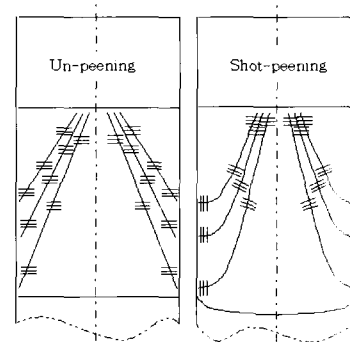


Fig 3.9 Striation of Fatigue Crack Propagation.

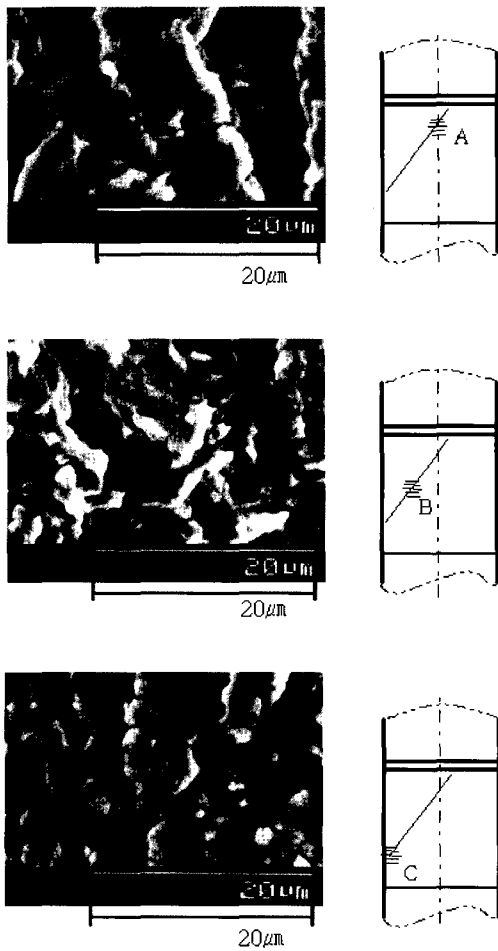


Photo 3. 4 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Un-peening).

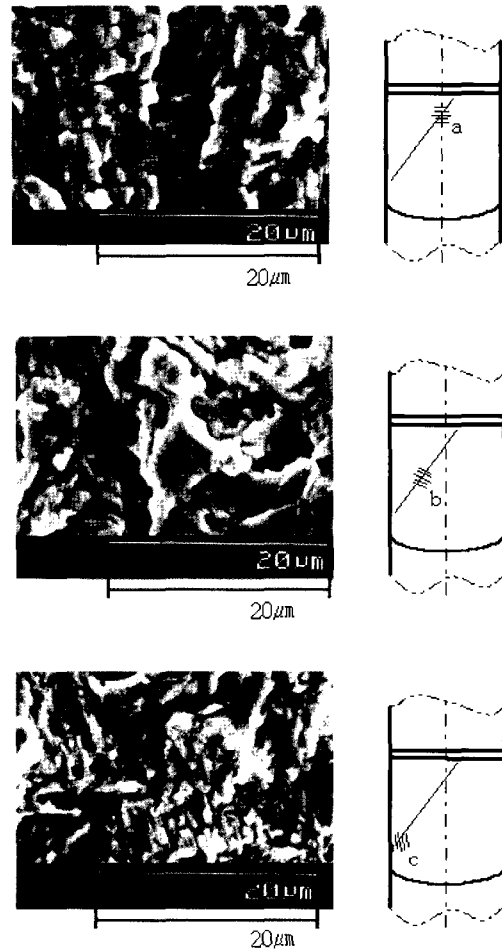


Photo 3. 5 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Shot-peening).

이 관찰되었고, 이러한 현상은 파면의 스트라이에이션(Striation) 방향의 형성과정을 관찰하므로써 판명되었다.^[8]

4. 결 론

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

1. 본 연구의 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 응력확대계수범위 $8 \sim 18\text{MPa} \sqrt{m}$ 에서 피로균열진전 특성에 균열진전억지력의 영향이 크다.
2. 언피닝(Un-peening)된 스프링강과 쇼트피닝

(Shot-peening)된 스프링강의 피로균열 진전속도는 쇼트피닝된 스프링강이 압축잔류응력의 영향으로 인해 30% 감소되었다.

3. 쇼트피닝된 스프링강이 언피닝상태의 스프링강보다 피로수명이 2배가량 향상되었다.

4. 쇼트피닝된 스프링강에서 오버쇼트피닝(Over Shot-peening, 3000rpm)된 스프링강은 본 연구의 정상 쇼트피닝(2200rpm)보다 피로수명이 20% 감소되어 2200rpm이 가장 적절한 쇼트피닝 투사 속도임을 알았다.

참 고 문 헌

- [1] 村上, 大南 : "破壊力學 入門", オ-ム社, pp. 121 ~ 127, 1979
- [2] 정성균, 이승호, "쇼트피닝 가공개론" 도서출판세화, pp. 6~12. Jan. 2001
- [3] 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
- [4] 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
- [5] 장동일, 정경섭, 한민구, 파괴역학 원창출판사 pp. 12~13, 1998, Jan
- [6] 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. 11~70, 1989.
- [7] Tange, A. and Takamura, N, "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
- [8] Willenborg, J., Engle, R. M. and Wood, H. A., "A Crack Growth Retardation Model Using and

Effective Stress Concept," AFFDL-TM-71-1-FBR, 1971

저 자 소 개

**박경동(朴卿東)**

1943년 2월 13일생. 1983년 동아대학교 대학원(공학박사). 1992년 3월 일본동경공대(공학박사). 1970~1974년 2월 동아대학교 기계공학과 교수. 1974년 3월~현재 부경대학교 기계공학과 교수.

**하경준(河璟俊)**

1955년 6월생. 1986년 2월 부산개방대학교 계설계학과 졸업. 1988년 2월 부산수산대학교 용기계과 졸업(석사). 2001년 부경대학교 기계공학과 박사과정. 1986년 3월~현재 대원강업 창원공장 설비계획원 차장. 한성기업 500톤급 내연기관 1등기 관사로 5년 근무. 갑종기관장 면허소지

**박형동(朴亨東)**

1958년 12월생. 1986년 2월 부경대학교 기계공학과 졸업. 1995년 부경대학교 산업대학원 기계공학과 졸업(석사). 1999년 8월 부경대학교 대학원(공학박사). 1986 4월~현재 부산주공주식회사 설비 보전과장 및 팀장.