

압축잔류응력이 스프링강의 고온환경 피로크랙 진전거동에 미치는 영향

박경동* . 정찬기**

An Effect of Compressive Residual Stress on a High Temperature Fatigue Crack Propagation Behavior of The Shot-peened Spring Steel

Keyoung-Dong Park, Chan-Gi Jung

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

Abstract

The lightness of components required in automobile and machinery industry is requiring high strength of components. In particular, manufacturing process and new materials development for solving the fatigue fracture problem attendant upon high strength of suspension of automobile are actively advanced.

In this paper, the effect of compressive residual stress of spring steel(JISG SUP-9) by shot-peening on fatigue crack growth characteristics in high temperatures(100°C, 150°C, 180°C) was investigated with considering fracture mechanics. So, we can obtain followings.

- (1) Compressive residual stress is decreased in high temperature, that is, with increasing temperature.
- (2) The effect of compressive residual stress on fatigue crack growth behavior in high temperature is increased below $\Delta K=17\sim 19MPa\sqrt{m}$.
 - The fatigue crack growth rate is increased with increasing temperature.
 - The fatigue life is decreased with increasing temperature.
- (3) The dependence of temperature and compressive residual stress on the parameters C and m in Paris' law formed the formulas such as equations (3),(4),(5),(6),(7),(8),(9),(10).
- (4) It was investigated by SEM that the constraint of compress residual stress for plastic zone of fatigue crack tip was decreased in high temperature as compared with room temperature.

1. 서론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비
자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장

치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한
철강(금속)소재 분야에서 활발히 연구되어지고
있다.

부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화(고응
력화)는 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료
절감과 고출력화(연료절감)이라는 이점을 갖고
있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해
지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있
지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항
복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서
히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴 되는 현

* 회원, 부경대학교 기계공학부

** 회원, 대원강업 창원공장

E-mail : cgjung@dwku.com

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

상이 발생된다.⁽¹⁾

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 실증하였다.⁽²⁾

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.^(3,4)

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 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 Factor)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 가고 있다.⁽⁵⁾

본 논문에서는 실험적으로 어려운 스프링강(JISG SUP-9)의 표면에 쇼트피닝가공하여 형성된 압축잔류응력을 정성적으로 조사하고, 전기유

압서어보 피로시험기에서 고온 환경하의 피로균열진전거동에서의 피로균열 안정성장구간과 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수를 정식화하고 피로균열 진전 파면 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 2.1에 표시하였고, Table 2.2는 시험편 재료의 기계적 성질로서 Fig 2.1과 같은 조건에서 열처리(Quenching & Tempering)한 후의 결과이다. 기계적 성질을 시험하기 위한 인장시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 13mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 플랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig 2.1과 같은 조건으로 970℃에서 20분간 가열한 후 유중에서 담금질하여 정상적인 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 이 시험편을 다시 490℃에서 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 2.2와 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 (MPa)	Hardness(HRC)		Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
		after Quenching	after Tempering		
JISG SUP-9	1226	55	47	1079	9

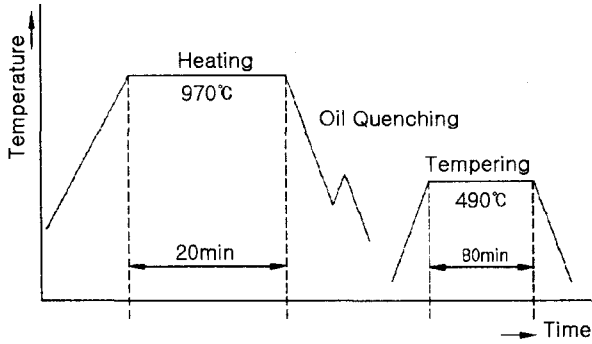


Fig. 2.1 Condition of Heat-treatment

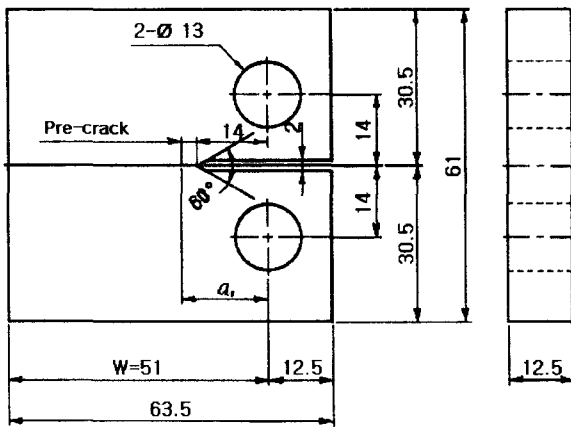


Fig. 2.2 Dimension of CT-Specimen

2.2 시험편의 압축잔류응력 부여

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터어빈식 쇼트피닝기로 Table 2.3과 같은 쇼트피닝 조건 하에서 쇼트피닝을 실행하였다.

2.3 실험방법

완성된 CT 시험편의 피로진전실험은 전기유압서어보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중 제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 적용응력비는 $R=0.3$, 주파수는 10Hz로 하였으며 피로균열 길이측정은 크립게이지를 이용한 컴프라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온환경(25°C)과 고온환경(100°C, 150°C, 180°C)에서 실험하였다. Fig. 2.3은 실험장치의 구성도이다.

Table 2.3 Condition of Shot-Peening

Impeller Diameter (mm)	Shot Velocity (rpm)	Shot Ball Diameter (mm)	Arc Height (mm)	Cover-age (%)
490	2200	0.8	0.49	95

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	

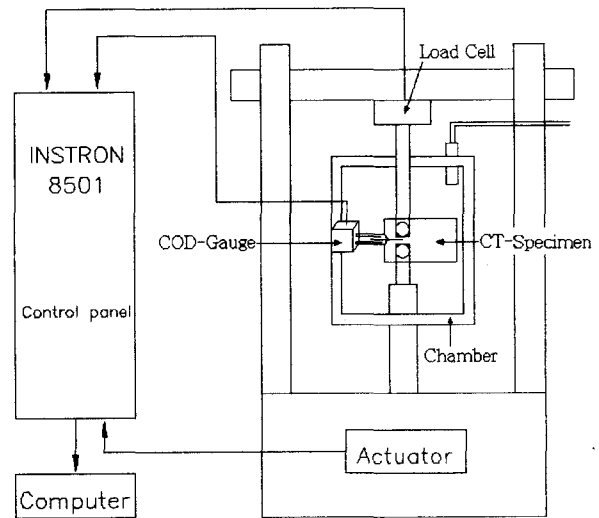


Fig. 2.3 Schematic Diagram of low temperature Fatigue testing machine

시험편의 초기크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 $10MPa\sqrt{m}$ 로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 진행하였고 초기크랙진전길이 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.⁽⁶⁾

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

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

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

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 압축잔류응력

Fig 3.1은 상온(25 $^{\circ}\text{C}$)에서의 압축잔류응력의 분포와 고온환경(100 $^{\circ}\text{C}$, 150 $^{\circ}\text{C}$, 180 $^{\circ}\text{C}$)에서 C.T시험 후 변화된 압축잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 여기서 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 100 $^{\circ}\text{C}$ 환경에서 45MPa(6%), 150 $^{\circ}\text{C}$ 환경에서 88MPa(12%), 180 $^{\circ}\text{C}$ 환경에서 103MPa(14%)가 소멸됨으로서 온도가 상승할수록 압축잔류응력은 소멸되는 것이 관찰되었다.

3.2 피로크랙 진전거동

Fig 3.2는 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열 진전속도 da/dN 와의 관계이며, 여기서 응력비 $R = P_{min}/P_{max}$ 는 0.3이 된다. 그리고 피로균열 진전곡선에서 직선부분이 중간속도영역이며 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수범위는 수직선이 된다. 중간속도영역은 다음 식(2)와 같다.

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

여기서 C 는 재료상수이며 m 은 피로균열진전지수가 된다.^(7, 8)

Table 3.1은 중간속도 영역에서 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열진전속도 da/dN 를 보여주고 있으며, $\Delta K = 10 \text{MPa}\sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 상온환경에 비하여 고온환경인 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 12%, 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 21%, 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 35%가 증가되었다.

Fig 3.3은 크랙진전길이 a 와 하중가진횟수 N 과의 관계 그래프이며, 피로크랙진전길이 $a = 34 \text{mm}$ 에서 피로수명은 상온환경에 비하여 고온환경인 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 44%, 150 $^{\circ}\text{C}$ 에서 50%, 180 $^{\circ}\text{C}$ 에서 64%가 감소되었다.

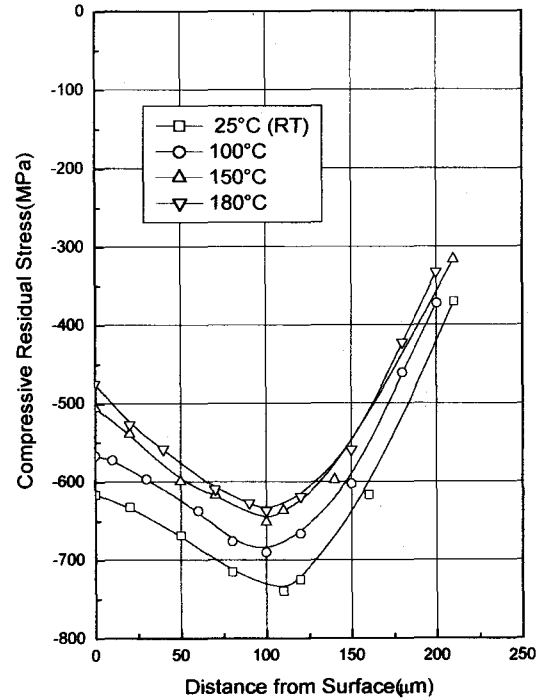


Fig. 3.1 Compressive Residual Stress Distributions of Specimen Surface

Table 3.1 Experimental Constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the Fatigue Crack Growth

	ΔK Range ($\text{MPa}\sqrt{m}$)	da/dN Range (mm/cycle)
RT 25 $^{\circ}\text{C}$	$8.39 \leq \Delta K \leq 17.22$	$1.80 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.55 \times 10^{-5}$
100 $^{\circ}\text{C}$	$6.26 \leq \Delta K \leq 18.12$	$1.73 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.29 \times 10^{-5}$
150 $^{\circ}\text{C}$	$5.83 \leq \Delta K \leq 17.68$	$1.66 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.04 \times 10^{-5}$
180 $^{\circ}\text{C}$	$5.37 \leq \Delta K \leq 17.59$	$1.69 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 3.07 \times 10^{-5}$

3.3 C와 m의 정식화

Fig 3.4는 C 와 m 의 관계 그래프이고, Fig 3.5는 C 와 m 값의 고온환경(온도)의 의존성을 보여주고 있으며, 100 $^{\circ}\text{C}$ 에서 의존성의 급격한 변화가 있다. 재료상수 C 의 값은 온도의 증가에 따라 증가하는 경향이고 피로균열진전지수 m 값은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig 3.6은 C 와 m 값이 고온환경변화에 따라 압축잔류응력 σ_R 의 의존성을 나타내고 있으며, 압축잔류응력의 감소에 따라 C 의 값은 증가하고 m 의

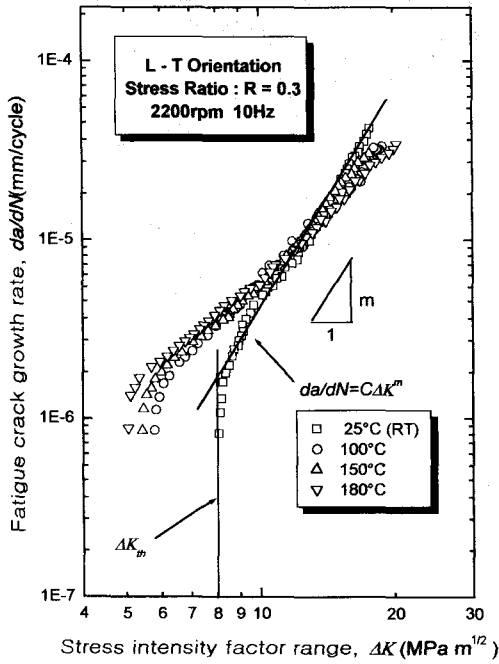


Fig 3.2 Relation between Fatigue Crack Growth Rate and Stress Intensity Factor Range

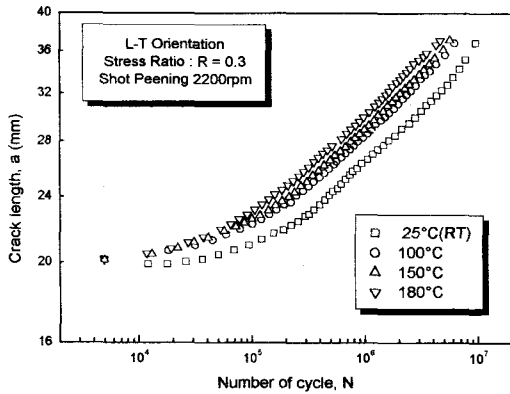


Fig 3.3 Relation between Crack Length and Number of Cycle

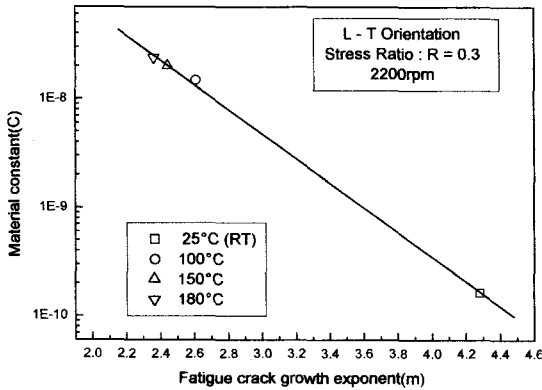


Fig 3.4 Correlation between C and m in Paris Law $da/dN = C\Delta K^m$

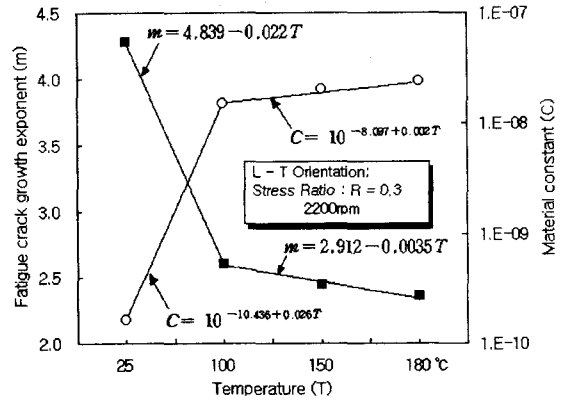


Fig 3.5 Relation Between Dependence on Temperature and C, m in Paris Law $da/dN = C\Delta K^m$

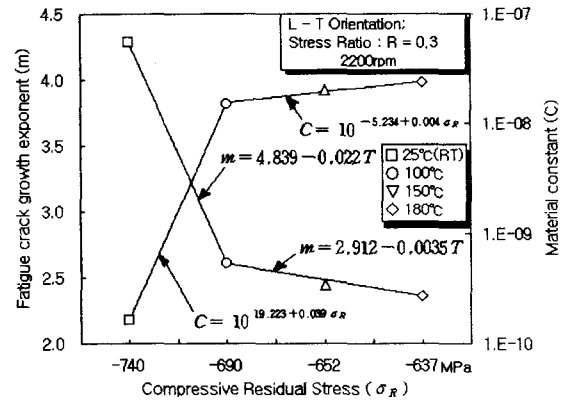


Fig 3.6 Relation Between Dependence on Compressive Residual Stress and C, m in Paris Law $da/dN = C\Delta K^m$

값은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

따라서 식(2)와 같은 중간속도 영역을 결정하는 패리스식(Paris Law)의 C와 m에서 온도와 압축잔류응력의 의존성이 다음과 같이 성립되었다.

온도의존성에서 재료상수 C는

25 ≤ T ≤ 100 일 때

$$C = 3.664 \times 10^{-11} \times 1.06^{2T} \quad (3)$$

180 ≥ T ≥ 100 일 때

$$C = 9.660 \times 10^{-9} \times 1.00^{5T} \quad (4)$$

압축잔류응력 의존성에서 재료상수 C는

-740 ≤ σ_R ≤ -690 일 때

$$C = 1.1671 \times 10^{19} \times 1.0939^{\sigma_R} \quad (5)$$

-620 ≥ σ_R ≥ -690 일 때

$$C = 5.834 \times 10^{-6} \times 1.009^{\sigma_R} \quad (6)$$

온도의존성에서 피로균열진전지수 m 은

$$25 \leq T \leq 100 \text{ 일 때} \\ m = 4.839 - 0.022 T \quad (7)$$

$$180 \geq T \geq 100 \text{ 일 때} \\ m = 2.912 - 0.003 T \quad (8)$$

압축잔류응력 의존성에서 피로균열진전지수 m 은

$$-740 \leq \sigma_R \leq -690 \text{ 일 때} \\ m = -20.051 - 0.033 \sigma_R \quad (9)$$

$$-620 \geq \sigma_R \geq -690 \text{ 일 때} \\ m = -0.537 - 0.00456 \sigma_R \quad (10)$$

여기서 압축잔류응력 σ_R 의 단위는 MPa이며, 온도 T 의 단위는 $^{\circ}\text{C}$ 가된다.

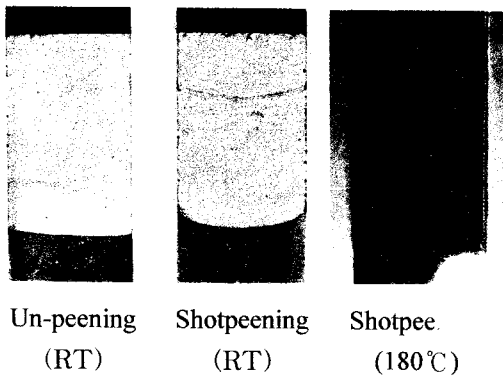


Photo 3.1 Photographs of Fracture Surface

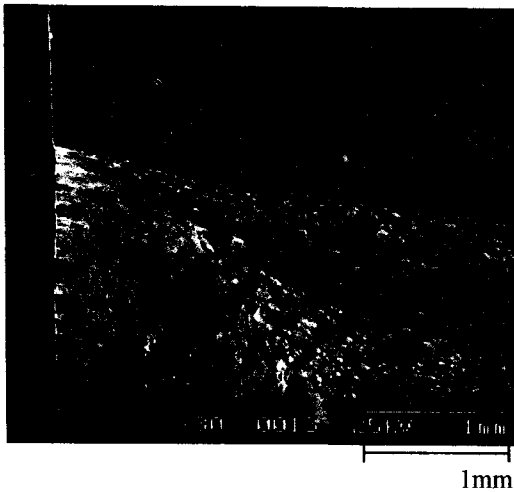


Photo 3.2 SEM Photographs of Fracture Surface
Un-peening(RT)

3.4 피로균열진전 파면의 양상

C.T시험편의 피로균열진전 파면의 양상을 관찰하기 위해서 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피이닝(Un-Peening) 시험편의 상온(25°C)실험 파단

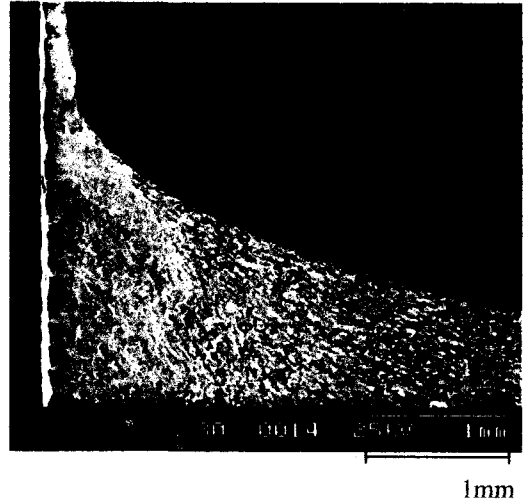


Photo 3.3 SEM Photographs of Fracture Surface
Shot-peening(RT)

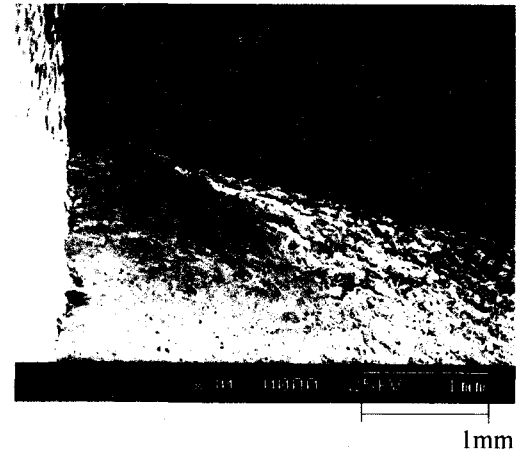


Photo 3.4 SEM Photographs of Fracture Surface
Shot-peening(180°C)

면과 본 실험의 쇼트피이닝 가공된 시험편에 대한 고온환경 실험 파단면을 비교하였다.

Photo 3.1은 언피이닝 시험편의 상온환경실험과 쇼트피이닝 시험편의 상온환경 실험 및 쇼트피이닝 시험편의 고온환경 실험에 대한 피로균열진전 파면의 실물사진이고 Photo 3.2, 3.3, 3.4는 균열선단 표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다.

언피이닝 시험편의 파면과 쇼트피이닝 시험편의 파면양상은 현저한 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰 할 수 있으나 쇼트피이닝 시험편의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상은 고온

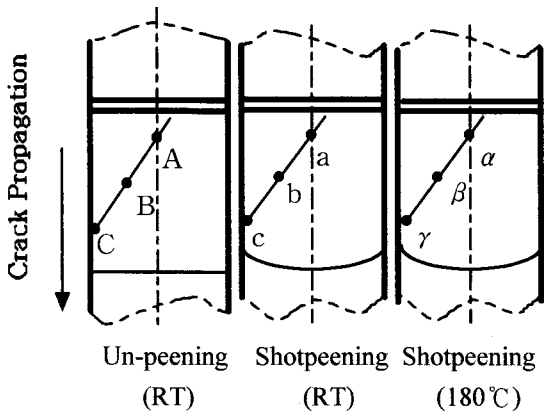


Fig 3.7 Picture Point of Fracture Surface

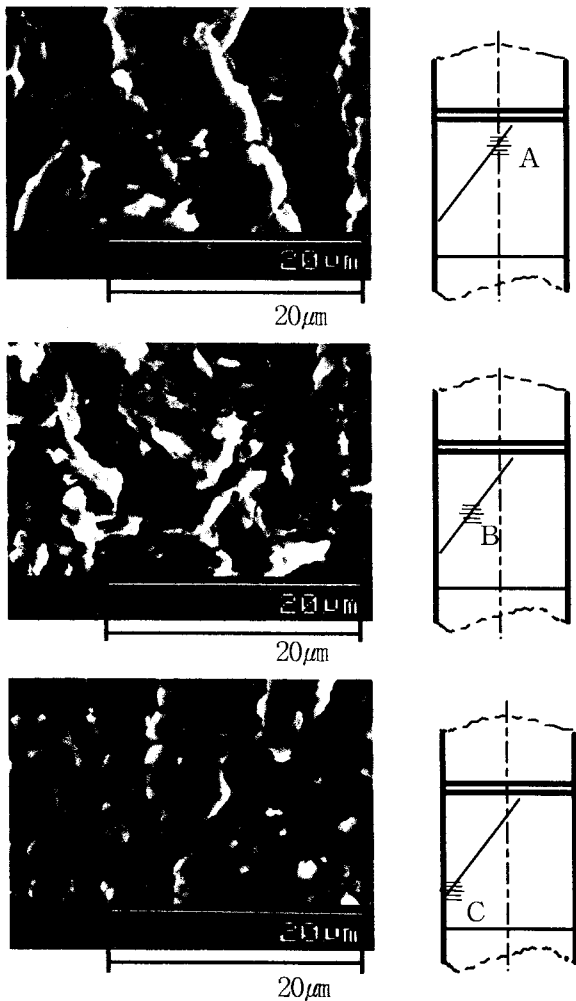


Photo 3.5 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Un-peening, RT)

환경 피로균열진전에서 균열선단 소성영역에 대한 구속력이 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에 관찰되었다.⁽⁹⁾

Fig3.7은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한

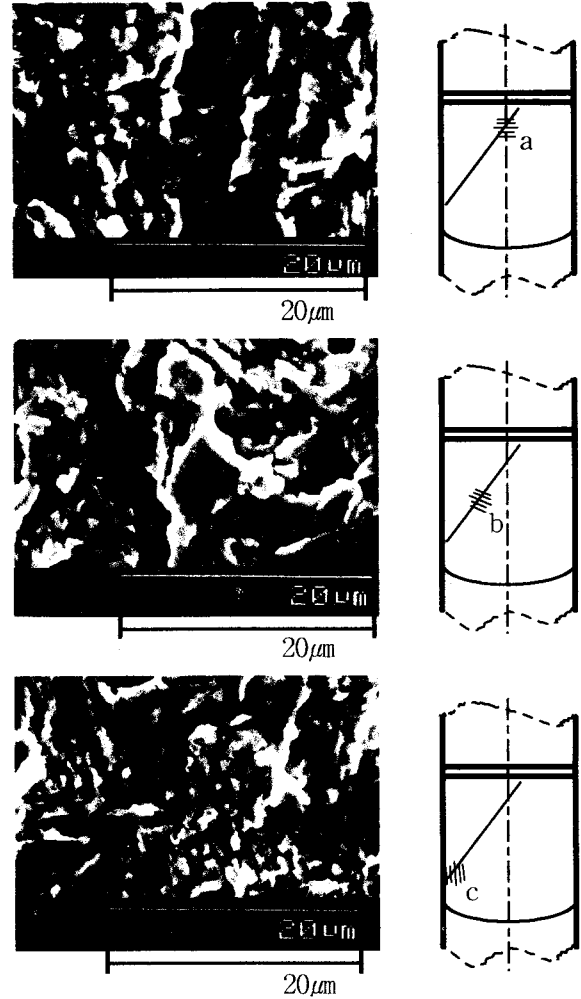


Photo 3.6 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Shot-peening, RT)

SEM사진촬영지점이고, Photo 3.5, 3.6, 3.7은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전 과정에서 Fig 3.8과 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션(Striation)방향형성에 현저한 차이가 있었다.

4. 결론

쇼트피닝가공한 스프링강(JISG SUP-9)의 압축잔류응력이 고온환경에서 피로균열진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 고온환경 100℃에서 6%, 150℃에서 12%, 180℃에서 14% 소멸되었다.

(2) 응력확대계수 범위 17~19 MPa√m이하에

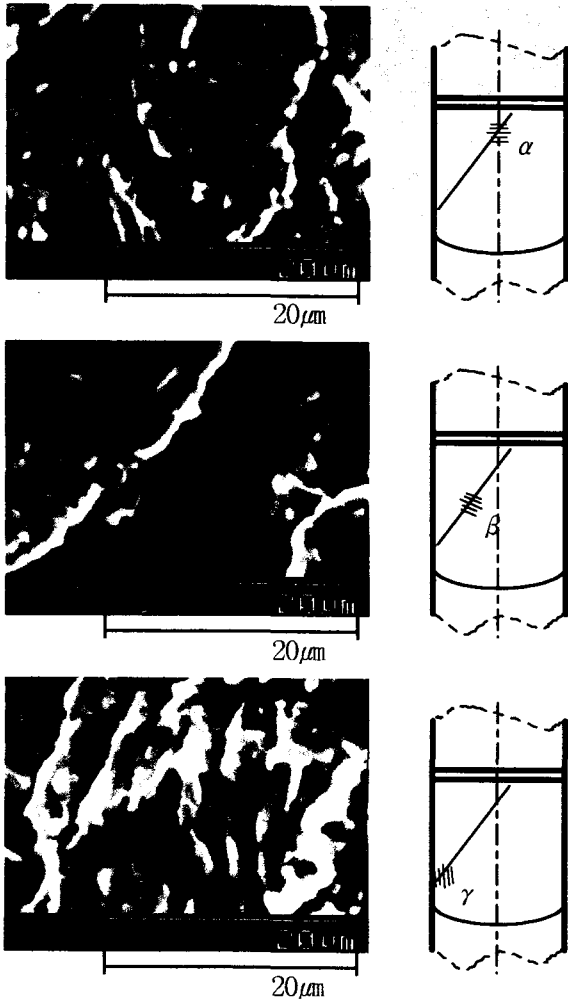


Photo 3.7 Striation of Fatigue Crack Propagation by SEM(Shot-peening, 180°C)

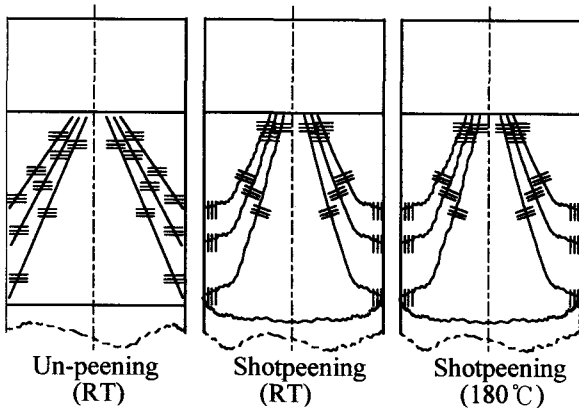


Fig 3.8 Striation of Fatigue Crack Propagation
 서 압축잔류응력은 고온환경 피로균열진전거동에 미치는 영향이 크다.

(3) 중간속도영역(Stage II)에서의 피로균열진전 속도는 상온환경에 비하여 고온환경인 100°C에서 12%, 150°C에서 21%, 180°C에서 35%가 증가

되었으며, 피로수명은 44%, 50%, 64%가 감소되었다.

(4) 패리스 식(Paris Law)의 C와 m에 대한 온도와 압축잔류응력의 의존성은 식(3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10)과 같이 정식화가 성립되었다.

(5) 피로크랙진전 파면을 주사식 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과 피로균열 파면양상에서 상온환경에 비하여 고온환경 피로균열파면이 피로균열전단의 소성영역에 대한 구속력을 감소시키는 양상이 관찰되었다.

참고문헌

- (1) 村上, 大南 : 破壊力學 入門, オ-ム社, pp 121-127, 1979
- (2) 정성균, 이승호, 쇼트피닝 가공개론 도서출판 세화, pp6~12. 2001,Jan
- (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 pp12~13, 1998, Jan
- (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, Oct
- (7) 朴卿東, 原子盧用 低合金鋼의 高溫疲勞 크랙 전이와 크랙 開閉口 特性에 關한 研究, 동아대학교 박사학위논문, 1983
- (8) 김재훈, 기계구조용재료의 피로균열진전거동에 관한 연구, 충남대학교 박사학위논문, pp10-16, 1989
- (9) 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