

압축잔류응력이 스프링강의 고온환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향

정찬기* · 박경동**

*대원강업 창원공장

**부경대학교 기계공학부

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

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

*Dae Won Kang Up Co. Ltd., Changwon, Korea

**Pukyong National University, Busan, Korea

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

ABSTRACT: In this paper, the effect of the compressive residual stresses was obtained at the test conditions of the higher temperature than the ambient temperature. The examination was performed with the CT specimen result of the material(JISG SUP9) which is being commonly used for the marine engine parts and the ocean structures. As a result, the test conditions at the higher temperature were acquired considering the peak values of the compressive residual stresses of the specimens and the effect on the fatigue crack propagation speed da/dN in stage II and the threshold stress intensity factor range ΔK_{th} in stage I. Also the material constant C and the fatigue crack propagation index m in the formula of Paris Law $da/dN = C (\Delta K)^m$ were suggested to estimate the dependence on the test temperature.

1. 서 론

해양기술과 관련된 산업환경은 기계장치와 구조물의 경량화를 요구하고 있다. 따라서 각 요소에 필요한 철강소재에 대한 고강도화와 신소재개발분야에서 활발히 연구되어지고 있다.

해양선박의 구조물과 기계장치 설계시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료절감과 연료절감이라는 이점을 갖고 있으나, 고강도화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 금속파괴되는 현상이 발생된다.

이와 같이 금속에서 발생하는 피로파괴 현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화된 산업기술사회에 피로파괴 방지기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다 (박경동과 정찬기, 2001).

금속의 표면처리에 의한 피로강도 향상 방법 중 쇼트피닝에 의한 표면의 압축잔류응력 부여 방법은 1927년에 Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 금속표면의 경화층

을 시험한 것을 시초로 하여 1935년에 Weibel이 엔진 밸브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시킨 결과를 발표하였고, 1940년에 Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하였다 (Zimmerli, 1952).

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

특히 압축잔류응력은 금속의 극표면부에 형성되고 압축잔류응력치가 높게 형성될수록 피로수명이 증가되며, 압축잔류응력은 상온에 비하여 주위온도가 증가할수록 압축잔류응력치가 감소되어 피로수명지연효과가 감소되는 것으로 알려져 있다 (Ozone and Hijikata, 1988).

이와같이 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력의 영향은 로타리벤딩시험, 상하단순벤딩시험등과 같은 방법으로 피로한도를 규명하여왔으나, 고온환경에서 CT시험에 의한 피로균열진전속도, 응력확대계수범위, 하한계응력확대계수가 미시적으로 규명되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 해양선박 요소부품 및 해양 구조물에 주로 사용되는 스프링강의 표면을 쇼트피닝가공

제1저자 정찬기 연락처: 경상남도 창원시 웅남동 54번지
055-269-8505 cgjung@dwku.com

하여 형성된 압축잔류응력이 고온환경에서 피로균열진전속도 da/dN , 응력확대계수범위 ΔK , 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 를 실험적으로 규명하고 중간속도영역(Stage II)에서 패리스식(Paris Law) $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 재료상수 C 와 피로균열진전지수 m 값에 대한 직선식을 제안하였다. 그리고 압축잔류응력이 형성된 극표면부의 피로균열진전과단면에 대한 균열진전기구를 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하여 부품설계시 고려해야할 고온환경 허용응력범위와 피로한도를 예측하여 설계자의 최적설계에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 시험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 해양선박엔진요소부품 및 해양구조물에 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 열간압연된 프렛바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 한편 시험편의 열처리는 Fig. 1과 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 금속현미경(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

2.1절과 같이 완성된 CT시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터빈식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건 하에서 쇼트피닝을 실행하였으며 시험편 표면에 형성된 압축잔류응력은 Fig. 4의 25°C(RT)곡선과 같이 분포되고 있고, 압축잔류응력의 최대치는 표면으로부터 110 μ m 깊이에 730MPa로 분석되었다.

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

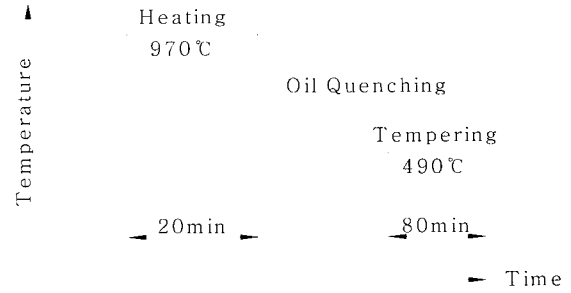


Fig. 1 Condition of heat-treatment

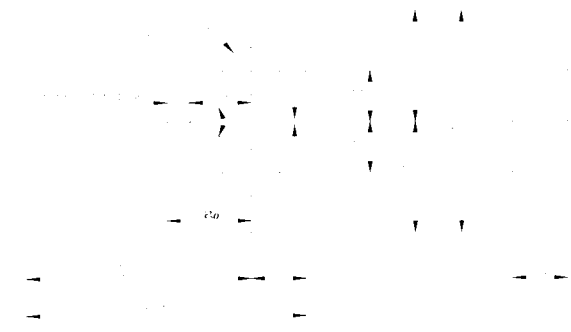


Fig. 2 Dimension of CT-specimen

Table 3 Condition of shot-peening

Impeller Diameter [mm]	Shot Velocity [rpm]	Shot Ball Diameter [mm]	Arc Height [mm]	Coverage [%]
490	2200	0.8	0.49	95

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

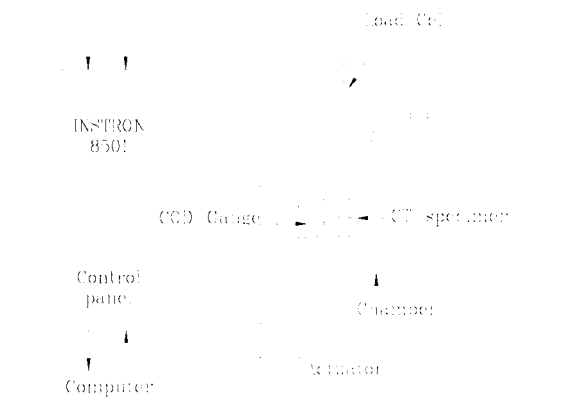


Fig. 3 Schematic diagram of high temperature fatigue testing machine

2.3 실험방법

완성된 CT시험편의 피로진전실험은 전기유압서어보 피로시험기(INSTRON 8501)에 의한 하중제어 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. 3은 실험장치의 구성도이다.

시험편의 초기균열은 응력확대계수 범위 ΔK 를 $10MPa\sqrt{m}$ 로 하여 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가범으로 진행하였고 초기 균열진전길이 3~5mm지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 저감범으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 식(1)과 같다 (Tange and Takamura, 1990).

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

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

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 μm 깊이단위로 300~350 μm 깊이까지 측정하였다.

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 압축잔류응력변화

Fig. 4는 상온(25°C)에서 표면으로부터 깊이방향으로 형성된 압축잔류응력의 분포와 고온환경(100°C, 150°C, 180°C)에서 C.T 실험 후 변화된 압축잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 여기서 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 100°C 환경에서 45MPa(6%), 150°C 환경에서 88MPa(12%), 180°C 환경에서 103MPa(14%)가 감소됨으로써 온도가 상승할수록 압축잔류응력은 감소되는 것이 관찰되었다.

3.2 피로균열 진전거동

Fig. 5는 응력확대계수범위 ΔK 와 피로균열진전속도 da/dN 와의 관계이며, 여기서 응력비 $R=P_{min}/P_{max}$ 는 0.3이 된다. 그리고 피로균열진전곡선에서 직선부분이 중간속도영역이며 피로균열진전이 정지되는 하한계응력확대계수범위는 수직선이 된다. 중간속도영역은 다음 식(2)와 같다.

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

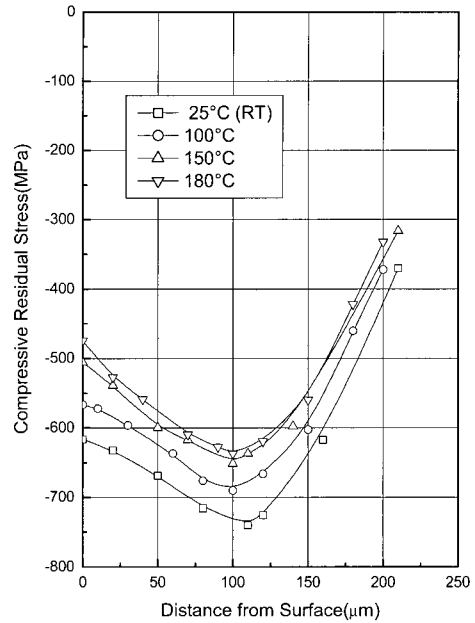


Fig. 4 Compressive residual stress distributions of specimen Surface

Table 5 Experimental constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the fatigue crack growth

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

여기서 C 는 재료상수이며 m 은 피로균열진전지수가 된다 (Paris and Erdogan, 1963).

Table 5는 중간속도 영역에서 응력확대계수범위 ΔK 와 피로 균열진전속도 da/dN 를 보여주고 있으며, $\Delta K=10MPa\sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 상온환경에 비하여 고온환경인 100°C에서 12%, 150°C에서 21%, 180°C에서 35%가 증가되었다.

Fig. 6은 균열진전길이 a 와 하중가진횟수 N 과의 관계그래프이며, 피로균열진전길이 $a = 34mm$ 에서 피로수명은 상온환경에 비하여 고온환경인 100°C에서 44%, 150°C에서 50%, 180°C에서 64%가 감소되었다.

3.3 C와 m의 정식화

Fig. 7은 C 와 m 의 관계그래프이고, Fig. 8은 C 와 m 값의 고온환경(온도)의 의존성을 보여주고 있으며, 100°C에서 의존

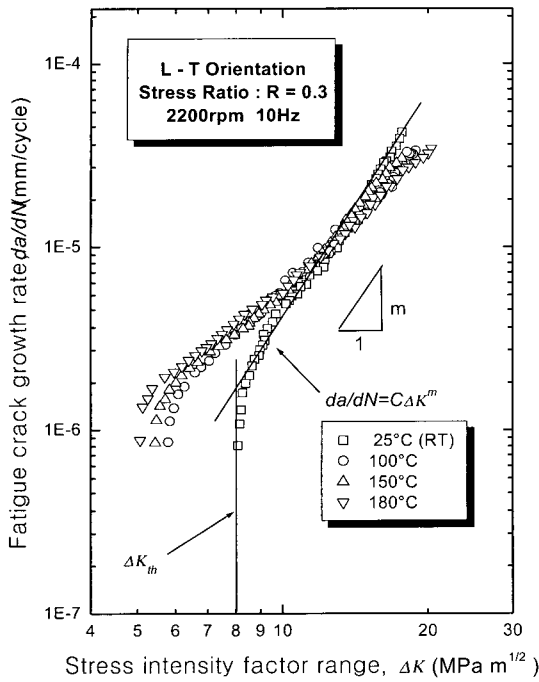


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

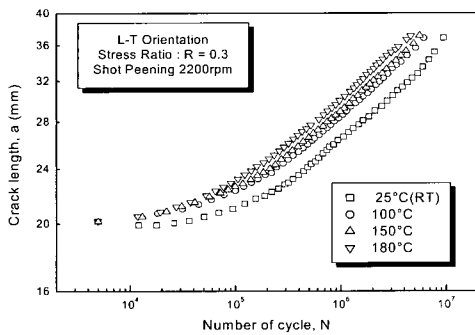


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycle

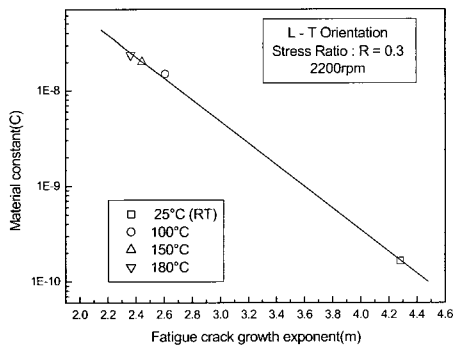


Fig. 7 Correlation between C and m in Paris law $da/dN = C\Delta K^m$

성의 급격한 변화가 있다. 재료상수 C 의 값은 온도의 증가에 따라 증가하는 경향이고 피로균열진전지수 m 값은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

Fig. 9는 C 와 m 값이 고온환경변화에 따라 압축잔류응력 σ_R 의존성을 나타내고 있으며, 압축잔류응력의 감소에 따라 C 의 값은 증가하고 m 의 값은 감소하는 경향을 보여주고 있다.

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

온도의존성에서 재료상수 C 는

25 ≤ T ≤ 100 일 때

$$C = 3.664 \times 10^{-11} \times 1.062^T \quad (3)$$

180 ≥ T ≥ 100 일 때

$$C = 9.660 \times 10^{-9} \times 1.005^T \quad (4)$$

압축잔류응력 의존성에서 재료상수 C 는

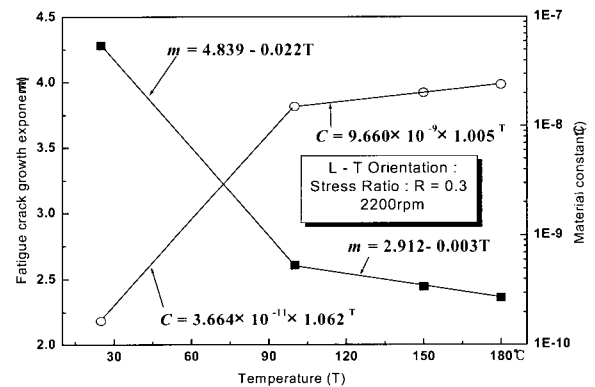


Fig. 8 Relation between dependence on temperature and C, m in Paris law $da/dN = C\Delta K^m$

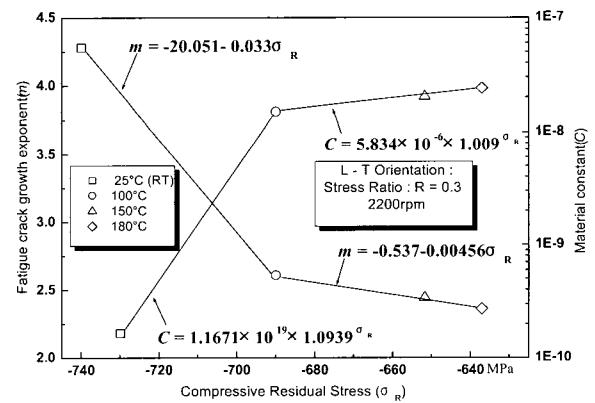


Fig. 9 Relation between dependence on compressive residual stress and C, m in Paris law $da/dN = C\Delta K^m$

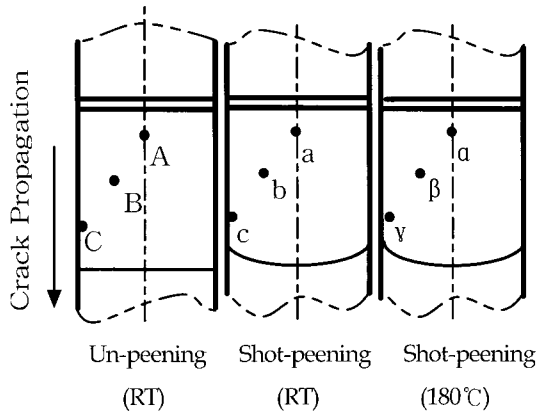
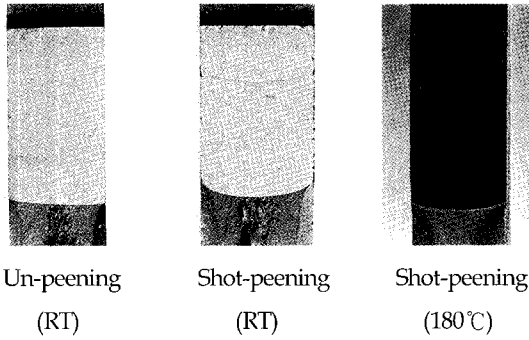


Fig. 10 Picture Point of Fracture Surface



- 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 ≤ *T* ≤ 100 일 때

$$m = 4.839 - 0.022 T \quad (7)$$

180 ≥ *T* ≥ 100 일 때

$$m = 2.912 - 0.003 T \quad (8)$$

압축잔류응력 의존성에서 피로균열진전지수 *m*은

- 740 ≤ σ_R ≤ - 690 일 때

$$m = -20.051 - 0.033 \sigma_R \quad (9)$$

- 620 ≥ σ_R ≥ - 690 일 때

$$m = -0.537 - 0.00456 \sigma_R \quad (10)$$

여기서 압축잔류응력 σ_R의 단위는 MPa이며, 온도 *T*의 단위는 °C가 된다.

Photo 1 Photographs of Fracture Surface

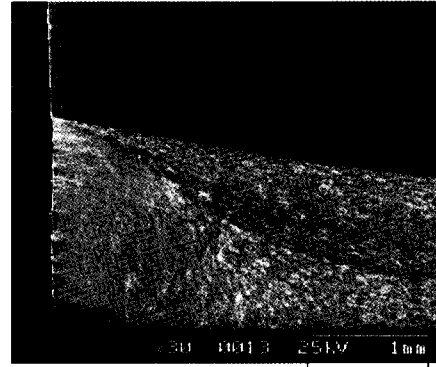


Photo 2 SEM Photographs of Fracture Surface(Un-peening, RT)

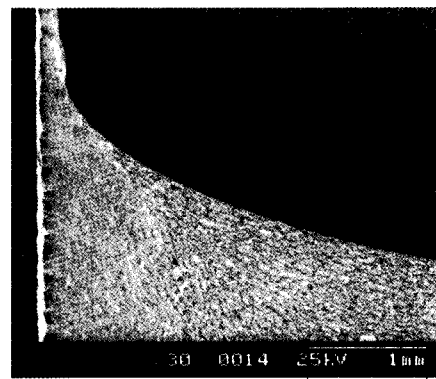


Photo 3 SEM Photographs of Fracture Surface(Shot-peening, RT)

3.4 피로균열진전 파면의 양상

CT시험편의 피로균열진전 파면의 양상을 관찰하기 위해서 압축잔류응력이 부여되지 않은 언피닝(Un-Peening) 시편의 상온(25°C) 실험 파단면과 본 실험의 쇼트피닝 가공된 시편에 대한 고온환경 실험 파단면을 비교하였다.

Photo 1은 언피닝 시편의 상온환경실험과 쇼트피닝 시편의 상온환경 실험 및 쇼트피닝 시편의 고온환경 실험에 대한 피로균열진전 파면의 실물사진이고 Photo 2, 3, 4는 균열선단 표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다.

언피닝 시편의 파면과 쇼트피닝 시편의 파면양상은 현저한 차이를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰할 수 있으나 쇼트피닝 시편의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상은 고온환경 피로균열진전에서 균열선단 소성영역에 대한 구속력이 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에서 관찰되었다. Fig. 10은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM사진촬영지점이고, Photo 5, 6, 7은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전 과정에서 Fig. 11과 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션 (Striation) 방향 형성에 현저한 차이가 있었다.

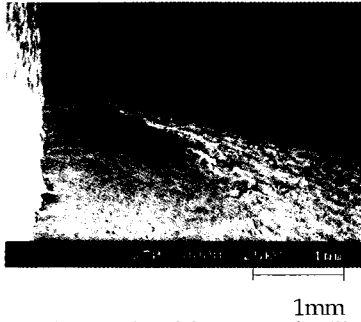
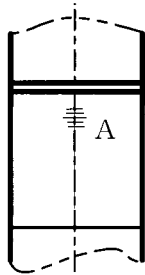
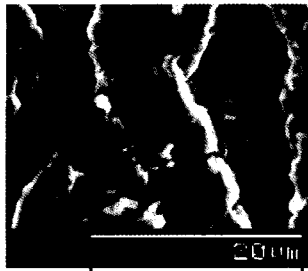
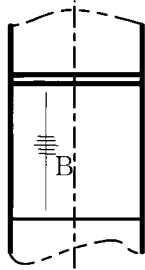


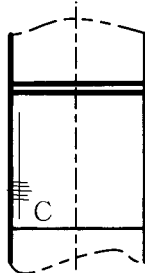
Photo 4 SEM photographs of fracture surface(Shot-peening, 180°C)



20µm

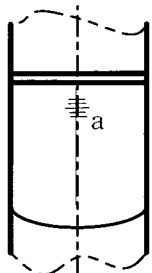


20µm

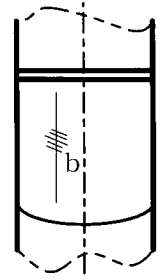


20µm

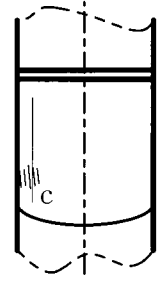
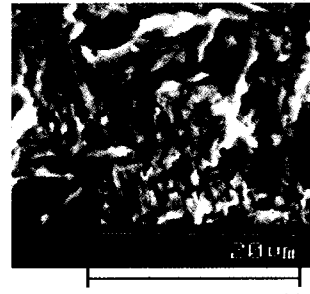
Photo 5 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Un-peening, RT)



20µm

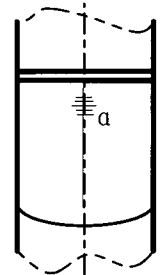
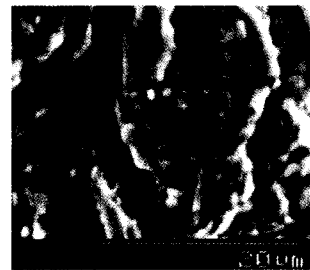


20µm

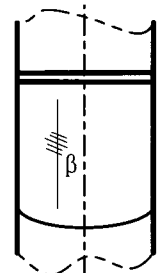
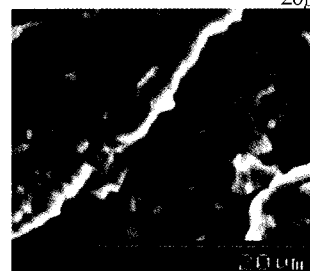


20µm

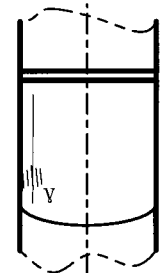
Photo 6 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, RT)



20µm



20µm



20µm

Photo 7 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, 180°C)

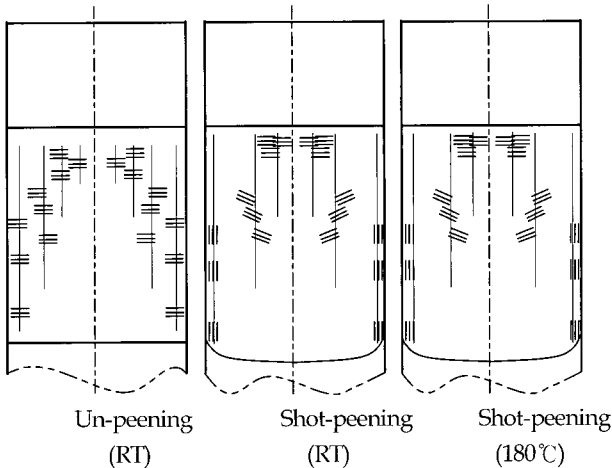


Fig. 11 Striation of fatigue crack propagation

4. 결 론

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 $MPa\sqrt{m}$ 이하에서 압축잔류응력은 고온환경 피로균열진전거동에 미치는 영향이 크다.
- (3) 중간속도영역(Stage II)에서의 피로균열진전속도는 상온환경에 비하여 고온환경인 100℃에서 12%, 150℃에서 21%, 180℃에서 35%가 증가되었으며, 피로수명은 44%, 50%, 64%가 감소되었다.
- (4) 패리스 식(Paris Law)의 C 와 m 에 대한 온도와 압축잔류응력의 의존성은 식 (3), (4), (5), (6), (7), (8), (9), (10) 과 같은 직선식이 제안되었다.
- (5) 쇼트피닝가공에 의해 금속표면에 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역내의 피로균열진전기구에 영향을 미친다는 것이 주사전자현미경(SEM)에 의한 파단면 양상 관찰에서 확인되었다.

참 고 문 헌

박경동, 김정호, 윤한기, 박원조 (2001). "압력용기용 SA516/70 강의 고온파괴인성평가", 한국해양학회지, 제15권, 제2호, pp 99-104.

박경동, 정찬기 (2001). "DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향", 한국해양학회지, 제15권, 제3호, pp 93-99.

Gillespie, R.D. (1993). "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue Characteristics", Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol 1, pp 81-90.

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.

Paris, P. and Erdogan, F. (1963). "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws", J. Basic Engineer Transactions of ASME, pp 528-534.

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, pp 243-253.

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, pp 316-331.

Zimmerli, F.P. (1952), "Heat Treating, Setting and Shot Peening of Mechanical Springs", Metal Progress, Vol 67, No 6, pp 97-106.

2002년 5월 10일 원고 접수

2002년 9월 27일 최종 수정본 채택