

# 스프링강의 피로파괴에 미치는 압축잔류응력의 영향

진영범\* · 박경동\*

## A Study on the effect of Compressive residual stress on fatigue crack propagation behavior of the spring steel

Young-Beom Jin, Keyung-Dong Park

**Key Words:** Crack growth(균열성장), Stress ratio(응력비), Fatigue life(피로수명), Crack range  
(균열범위), Compressive residual stress(압축잔류응력)

### Abstract

Recently the steel parts used for automobiles and trains are required to be used under higher stress than ever before in need of the weight down. However, there are a lot of problems with developing such materials that require expensive tools, and a great deal of time and effort. Therefore, the improvement of fatigue strength and fatigue life are mainly focused on by adopting residual stress. And got the following characteristics from crack growth test carried out stress ratio. Fatigue life shows more improvement in the Un-peening material. And compressive residual stress of surface on the Shot-peening processed operate resistance force of fatigue. 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.

### 1. 서 론

일반산업과 대형구조물에 있어서 설계 및 구조 건전성 평가 및 파손방지를 위한 다각적인 노력에도 불구하고 예기치 않는 파손 사고가 일어나 인명이나 물질 재산에 많은 피해를 준다. 이에 대형 중요 구조물이나 항공기, 선박, 건설 등에서 구조물 파괴를 방지하기 위해 학문적 연구 분야로 파괴역학의 발전을 연구하고 있다.

재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고응력화는 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료절감과 고효율화라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속내부의 결함에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정성장 하여 최종적으로 급속히 파괴되는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다.<sup>(1)</sup> 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있기에 현재와 같이 대형화된 산업기술사회에

\* 논문발표자의 소속 : 부경대학교 대학원

E-mail : csc8585@hanmail.net

TEL : (051)620-1592 FAX : (051)620-1592

\* 저자 2의 소속 : 부경대학교 기계공학부

피로파괴의 방지 기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다. 최근 신소재 개발로 인한 피로강도의 최적화를 위한 쇼트피닝 가공조건을 선택하려는 연구가 진행되고 있으며, 현재 쇼트피닝 가공의 연구는 항공기 및 자동차 분야에서 실용화되기 시작하였다. 또한 쇼트피닝 가공 후 재료의 중심부에서는 높은 인성을 유지하여, 피로 하중을 받는 기계 구조물의 수명향상에 좋은 것으로 평가되고 있다.<sup>(2)</sup> 따라서 본 연구에서는 쇼트피닝 가공에 의해 형성된 금속표면부의 압축잔류응력이 고강도화에 미치는 파괴 역학적 기구를 정량적으로 분석하기 위해 스프링강의 표면 부에 쇼트피닝 가공을 시행하여 압축잔류응력을 측정하고 압축잔류응력이 피로파괴 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 시험재료 및 방법

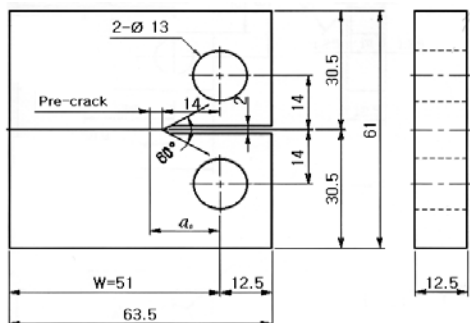
### 2.1 시험재료

본 연구에서 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, Table 1은 이 재료의 화학적 성분을 나타낸 것이며, Fig. 1은 피로파괴실험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

각부치수는 ASTM E647-93(1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어 커팅방전가공기로 가공하였다.<sup>(3)</sup>

**Table 1** Chemical composition of specimen (wt%)

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



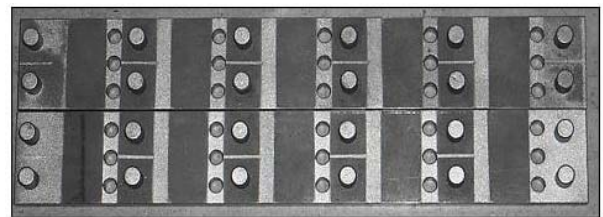
**Fig. 1** Configuration CT-specimen

### 2.2 쇼트피닝 가공

쇼트피닝 가공은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트 피닝기와 엔진밸브 스프링 제조용 쇼트피닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 2와 같다. Fig. 1은 CT 시험편의 표면에 쇼트피닝가공을 위한 치구로서 쇼트피닝 가공기의 회전하는 work table에 놓여진다.

**Table 2** Condition of Shot-peening

Condition	Shot-peening
Impeller Dia	490mm
Blades Width/Q'ty	90mm/6 pcs
shot-velocity	70m/s
Shot-Ball Dia	0.8mm
Time	24 sec
Arc Height(Alman A-Strip)	0.375 mm
Coverage	85%



**Fig. 2** Fixture of specimen

### 2.3 압축잔류응력

쇼트피닝된 시험편의 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(RIGAK-MSF2M)사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20μm 단위로 연마해 가면서 Table 3과 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

**Table 3** Measuring condition of residual stress

X-ray diffraction	Condition	
	X-ray source	Target
	Voltage	30kV
	Current	10mA
$\psi$	0°, 15°, 30°, 45°	
$2\theta$	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation counter	

측정결과 표면에서 150 $\mu$ m의 깊이 부에 -68kgf/mm<sup>2</sup> 크기의 최대 압축잔류응력이 형성되었다.

2.4 피로시험

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의한 하중감소 제어방식으로 실험하였다. 적용하중 파형은 정현파로 하고 응력비는 R=0.1, R=0.3, R=0.6 주파수는 10Hz로 하였다. 실험해석을 위해 응력확대계수범위  $\Delta K$ 는 다음과 같으며

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min} & (K_{min} > 0) \\ K_{max} & (K_{min} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

및 응력비 R은

$$R = K_{min} / K_{max} \quad (2)$$

의 함수가 된다.<sup>(4)</sup> 여기서 R의 영향을 제외하면 특성의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 그것은 Paris 법칙인

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (3)$$

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변하며, 여기서 C와 m은 각각 재료상수, 피로균열진전지수로서 이것으로 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 된다. 본 실험에서는 ASTM E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$ 제어에 의한 K감소 방식을 이용하는데 그 감소 조건은 다음과 같다.

$\Delta K$ 의 기울기는

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

da/dN의 측정범위는  $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ 이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 피로균열 진전 실험결과

Fig. 3은 변환응력비(R=0.1, R=0.3, R=0.6)에서 언피닝시편과 쇼트피닝시편의 피로균열진전속도비 da/dN와 응력확대계수  $\Delta K$ 의 관계를 도시하였다. 그림에서 피로균열진전속도비 da/dN를 수

치적으로 비교하면, 응력확대계수  $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때, 언피닝의 경우 응력비 R=0.1에서 da/dN=8.38 $\times 10^{-6}$ , R=0.3에서 da/dN=9.08 $\times 10^{-6}$ , R=0.6에서 da/dN=1.15 $\times 10^{-5}$ 이고, 쇼트피닝의 경우는 R=0.1에서 da/dN=4.69 $\times 10^{-6}$ , R=0.3에서 da/dN=5.32 $\times 10^{-6}$ , R=0.6에서 da/dN=8.59 $\times 10^{-6}$ 으로 나타났다.

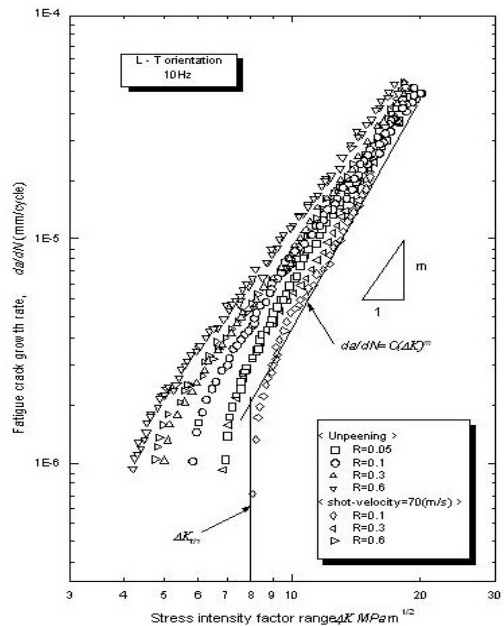
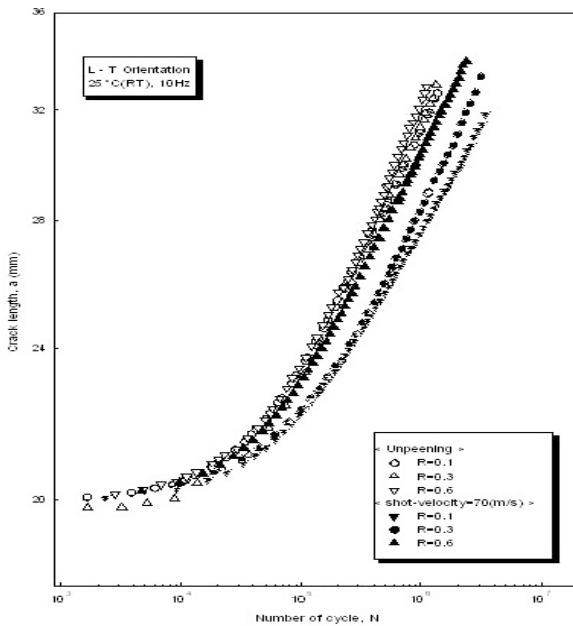


Fig. 3 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 3에서 그래프를 비교해 보면 언피닝재가 쇼트피닝재보다 빠르게 균열이 진전되고 있음을 알수 있다. 초기 응력확대계수  $\Delta K$ 가 크게 작용된 구간에서는 응력비의 영향이 작게 작용되어 피로수명은 근사하게 나타나고 있으나 응력확대계수  $\Delta K$ 가 작게 작용된 구간에서는 응력비의 영향이 크게 작용되어 피로수명은 급격히 차이를 보이고 있다. 이러한 현상은 쇼트피닝 가공재는 언피닝재에 비해 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 피로강도의 증가로 판단된다.<sup>(5)</sup>

3.2 쇼트피닝 재료의 변환응력비에서 피로균열진전길기와 사이클 수의 관계

Fig. 4는 상온 25 $^{\circ}$ C에서 쇼트피닝시편을 변환응력비(R=0.1, R=0.3, R=0.6)환경을 적용하여, 응력비별 균열길이 a와 하중반복사이클 N과의 관계를 언피닝시편의 결과와 비교 도시하였다.



**Fig. 4** Relation between crack length and number of cycle

그림에서 균열길이 28mm 지점을 기준으로하여 수치적으로 비교하면 쇼트피닝시편의 사이클 R=0.1에서  $1.1 \times 10^6$  Cycle, R=0.3에서  $8.7 \times 10^5$  Cycle R=0.6에서  $5.3 \times 10^5$  Cycle로 나타났다.

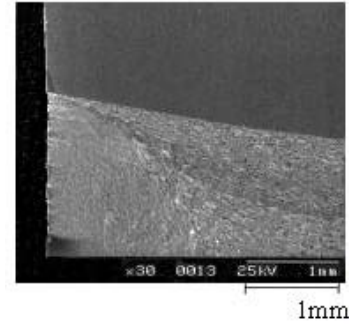
그리고 언피닝재의 사이클 수는 R=0.1에서  $4.8 \times 10^5$  Cycle, R=0.3에서  $4.5 \times 10^5$  Cycle, R=0.6에서  $54.1 \times 10^5$  Cycle로 나타났다. 각 응력비에서의 언피닝과 쇼트피닝시편의 피로수명은 쇼트피닝이 언피닝에 비하여 응력비 R=0.1에서 132%, R=0.3에서 93%, R=0.6에서 30%로 분석되었다.

이처럼 쇼트피닝재가 언피닝재보다 피로수명이 향상되었는데 이는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열전단의 구속으로 쇼트피닝재가 언피닝재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

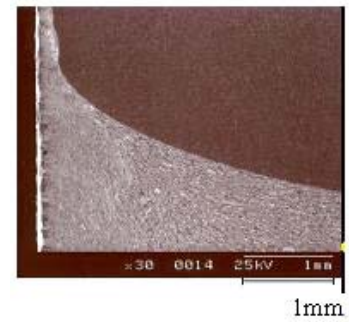
### 3.3 파단면의 특성

쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전기구에 미치는 영향을 관찰하기 위해, 고사이클 반복하중을 받는 CT시험편의 피로균열파단면을 주사식전자현미경(SEM)으로 관찰하였다. 쇼트피닝재와 언피닝재의 응력비 실험 파단면을 비교하였다. Fig. 5, 6은 균열전단표면부의 30배 확대 전자현미경 사진이다. 언피닝 시험편의 파단과 쇼트피닝 시험편의 파면양상은 현저한 차이

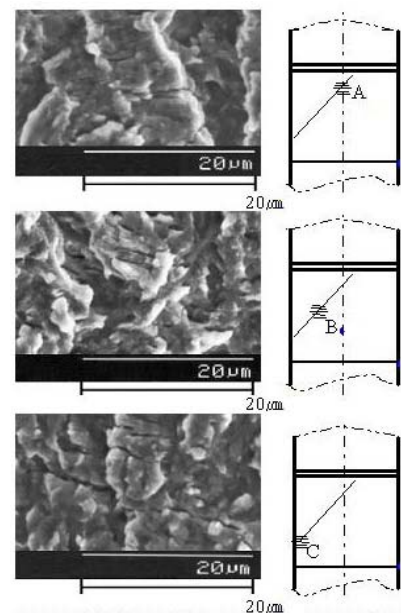
를 보이고 있으며, 이 현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열전단소성영역을 구속하므로 피로균열진전이 지연되는 현상을 관찰 할 수 있다.<sup>(6)</sup>



**Fig. 5** SEM photographs of un-peening(RT)fracture



**Fig. 6** SEM photographs of shot-peening(RT)fracture



**Fig. 7** Striation of fatigue crack propagation by SEM(un-peening)

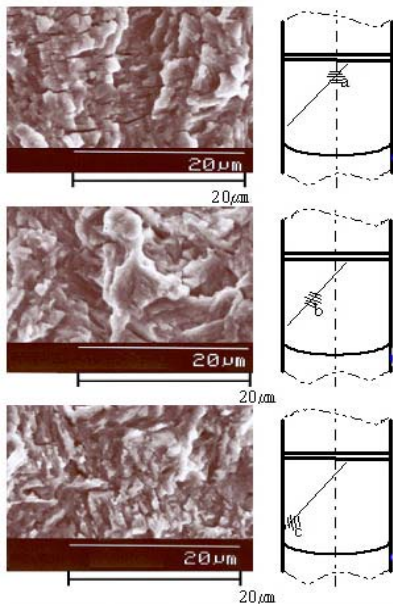


Fig. 8 Striation of fatigue crack propagation by SEM (shot-peening)

Fig. 7, 8은 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류 응력은 피로균열진전 과정에서 Fig. 8과 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향형성에 현저한 차이가 있었다.<sup>(7)</sup>

#### 4. 결론

쇼트피닝 가공한 스프링강(JISG SUP-9)의 압축 잔류응력이 피로균열진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) 압축잔류응력의 영향은 응력확대계수  $\Delta K$ 가 작고  $R=0.3$ 이하의 저응력비에서 크게 나타나는 것으로 판단된다.

(2) 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이  $R=0.3$ 이하의 저응력비에서는 피로균열진전거동에 영향을 주어 피로균열진전에 대한 구속력이 강하게 미치고 있지만,  $R=0.3$ 이상의 고응력비에서는 압축잔류응력의 구속이 급속히 감소된다.

(3) 피로균열진전 파단면의 양사관찰에서 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 피로균열선단 소성영역내의 탄소성변형기구에 작용하여 피로균열진전이 억제된다.

(4) 동일한 압축잔류응력이 형성된 시험편의 피

로균열진전 Stage II에서  $R=0.3$ 이하의 응력비에서는 피로균열진전속도  $da/dN$ 에 영향을 미치지 않았고,  $R=0.3$ 이상의 응력비에서는  $da/dN$ 이 가속되었다.

(5) 피로균열진전의 거시적인 양상은 하중제어 응력비를  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 으로 하였으며 균열의 성장면은 정상적인 스트라이에이션을 형성하였고, 균열의 성장은 응력의 작용방향에 대하여 수직으로 진행되었다.

#### 참고문헌

- (1) Murakami, Ominami, 1979, A Guide of Fracture Mechanics, O-mu Co., pp 121~127
- (2) Jung S.K, Lee S.H., 2001. Jan, A Guide of Shot peening processing, Sehwa Pub. pp6~12
- (3) 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, Oxford, pp.81~90
- (4) 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
- (5) Park K. D., Kim J. H., Youn H.K., Park W. J., 2001, Fatigue Crack Propagation Characteristics in SA 516/70 Steel for Pressure Vessels at High Temperature, KCORE, Vol. 15, pp.105~110
- (6) Kim J. H., 1898, 1971, A Study of Fatigue Crack Propagation Characteristics in Mechanical structural Steel, Chung-nam Uni. Thesis of doctorate, pp.10~16
- (7) 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