

## 선박용 스프링강의 피로수명에 미치는 쇼트피닝의 영향

박경동† · 유형주\*

(원고접수일 : 2005년 1월 11일, 심사완료일 : 2005년 3월 28일)

### A Effect of Shot Peening for Fatigue Life of Spring Steel for Vessel Application

Keyung-Dong Park† · Hyung-Ju Ryu\*

**Abstract :** The lightness of components required in automobile and machinery industries is requiring high strength of components. Therefore this requirement is accomplished as the process of shot-peening method that the compressive residual stress is made on the metal surface as one of various improvement methods. Special research is, therefore, needed about compressive residual stress on the metal surface in the process of shot-peening method. Therefore, in this paper the effect of compressive residual stress of spring steel(JISG SUP-9) by shot-peening on fatigue crack growth characteristics in environmental condition(temperature) and mechanical condition(shot velocity, stress ratio) was investigated with considering fracture mechanics. By using the methods mentioned above, the following conclusions have been drawn.

(1) The fatigue crack growth rate( $da/dN$ ) of the shot-peened material was lower than that of the un-peened one. In high temperature range, fatigue crack growth rate decreased with increasing temperature range, while fatigue crack growth rate increased by decreasing temperature in low temperature.

(2) Fatigue life shows more improvement in the shot-peened material than in the un-peened material. And compressive residual stress of surface on the shot-peen processed operate resistance force of fatigue crack propagation.

**Key words :** Shot peening(쇼트피닝), Fatigue crack growth rate(피로균열진전속도), Shot velocity(투사속도), Stress ratio(응력비), Environmental condition(환경조건), Threshold stress intensity factor(하한계 응력확대계수).

#### 1. 서 론

현재 산업사회에서 요구되는 경량화, 고강도화

에 대응하기 위해 대체 재질의 개발과 재료의 고  
응력화에 대한 연구가 이루어지고 있다. 그러나  
신소재의 개발은 막대한 비용이 들기 때문에 이미

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail : parkkd@pknu.ac.kr, Tel : 051)620-1592

\* 부경대학교 대학원 기계공학부

개발된 소재에서 가공방법을 달리하여 저렴한 비용으로 고강도화를 얻기 위한 기술이 활발히 연구되고 있다<sup>(1) (2)</sup>. 그러나 아직 쇼트피닝가공에 의한 피로강도 향상과 최적조건을 연구한 것을 찾아보기 힘들어 본 연구에서는 쇼트피닝가공에 의하여 형성된 금속표면부의 압축잔류응력이 고강도화에 기여하는 파괴역학적 기구를 정량적으로 체계화 및 피로수명 향상공법 개발을 위해 고온, 저온, 쇼트피닝 투사속도, 변환응력비 환경하의 피로균열 진전거동에서의 피로균열 안전성장구간과 피로균열진전이 정지되는 하한계 응력확대계수를 정식화하고 피로수명에 대한 실험을 실시하였다. 이처럼 각 환경에서 최적의 사용조건과 피로한도를 예측하여 피로강도와 피로수명 향상을 연구함으로써 현가장치(suspension) 최적설계에 유익한 데이터베이스를 구축하고자 한다. 또한 이로 인해 현가장치(suspension)들의 경량화 및 고강도화에 기여하고자 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

### 2.1 시험편

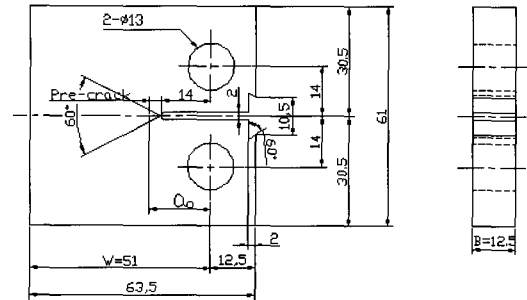
본 연구에 사용된 재료는 선박 및 해양구조물에 주로 사용되고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, Table 1에 이 재료의 화학적 성분을 Table 2는 기계적 성질로서 열처리(quenching & tempering)전 후의 결과이다. 피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께 12.5mm로 하였으며, 시험편의 채취는 열간 압연된 판재에서 압연방향과 균열의 전파방향이 직각이 되도록(L-T방향) 채취하였다. Fig. 1은 각 부 치수를 나타낸 것으로서, ASTM E647-93 규정에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공하였다<sup>(3) (4)</sup>.

**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		
SUP-9 (Non)	980	-	-	890	8.8
SUP-9 (Heat)	1226	55	47	1079	9



**Fig. 1 Configuration of CT-specimen (unit : mm)**

### 2.2 쇼트피닝가공 및 실험방법

Fig. 1과 같이 완성된 CT시험편 압축잔류응력을 부여하기 위해 치구에 고정하여 고속회전 터빈 방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건하에서 투사속도의 차이가 있는 4종류(56%, 70%, 83%, 96%)의 시험편을 제작하였다. 피로균열진전 시험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8501, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 기계적인 조건에 따른 실험결과를 알아보기 위해 응력비(R=0.1, 0.3, 0.6), 투사속도(56%, 70%, 83%, 96%)를 달리하여 주파수는 10Hz 정현파로 하였다. 또한 고온(100℃, 150℃, 180℃)·저온(-60℃, -80℃, -100℃)환경에 따라 실시하였고, 환경조성은 피로시험기에 챔버를 부착하여 온도유지가 ±1℃로 유지하였다. 피로균열 길이측정은 클립게이지를 이용한 콤플라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 의거 ΔK감소법으로 피로균열진전이 정지될 때 까지 실험하였다. 표면의 요철상태는 표면조도계(KOSAKA, Surfacerder SEF-30D)로 측정하였고, 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력의 측정은 X-선 잔류응력 측

정기(RIGAKU-MSF2M)로 Table 4와 같은 조건하에서  $2\theta\text{-sin}2\theta^{(5),(6)}$  계산방법을 적용하였다. 압축잔류응력의 깊이별 조사는 표면으로부터 20~30 $\mu\text{m}$  깊이단위로 300~350 $\mu\text{m}$  깊이까지 측정하였다<sup>(7)</sup>.

**Table 3 Condition of shot-peening**

Content	A	B	C	D
Impeller Diameter (mm)	Ø490			
Shot Velocity (rpm)	1800	2200	2600	3000
Shot Ball Diameter (mm)	Ø0.8			
Arc-Height (mm)	0.32	0.39	0.42	0.46
Time (Sec)	24			
Coverage (%)	85			

**Table 4 Measuring condition of residual stress**

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

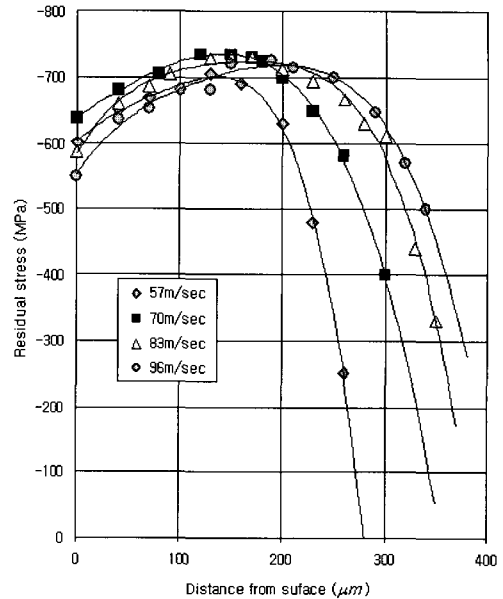
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 투사속도에 따른 피로전파특성

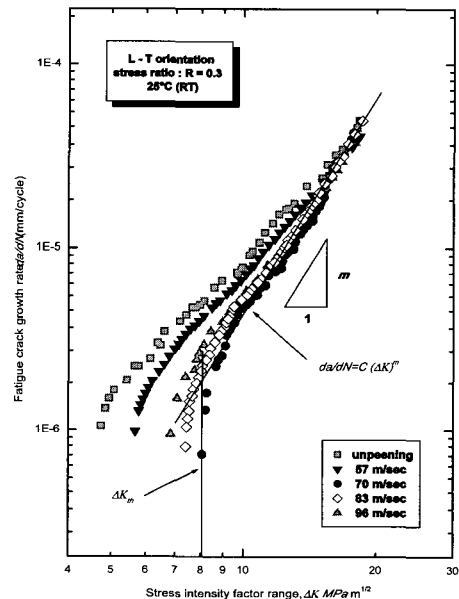
쇼트볼 투사속도에 따라 시험편에 형성된 압축 잔류응력을 X-선 잔류응력 측정기로 세 번씩 측정하여 얻은 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 압축잔류응력의 최대치는 투사속도 70%일때 735MPa로 가장 높았고, 그 이상의 속도에서는 점차 감소하여 96%일 때 726MPa로 나타났다.

Fig. 3은 응력비 R=0.3 정현파 10Hz, 상온(25°C)에서 피로균열진전속도(da/dN)와 응력확대계수 ( $\Delta K$ )와의 관계를 양대수 직선상에 투사속도별로 나타낸 그래프이고, 피로균열진전길이와

하중횟수와의 관계를 Fig. 4에 표시하였다. 응력 확대계수를  $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일때 피로균열진전속도와 균열길이 28mm지점에서의 하중반복횟수를 Table 5에 표시하였다.



**Fig. 2 Compressive residual stress distributions produced each shot velocity**



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

투사속도가 70%일때 균열진전속도가 가장 낮으며 이는 언피닝에 비하여 1.8배의 균열진전속도 지연효과가 있었다. 반면 투사속도가 70% 이상일 때는 균열진전속도의 가속효과가 있었으며, 피로수명은 사이클과 균열길이 관계에서 보여지듯이 적정 투사속도(70%)일때에 언피닝재( $6.1 \times 10^5$  cycle)에 비해 약 2배의 피로수명항상이 되고 있으며, 그 이상의 속도에서는 오히려 피로수명 감소의 결과가 나타났다. 이는 지나친 투사속도 가속에 의해 피가공물의 압축잔류응력치를 감소시키는 소위 오버피닝에 의한 것으로 판단되었다<sup>[8]</sup>.

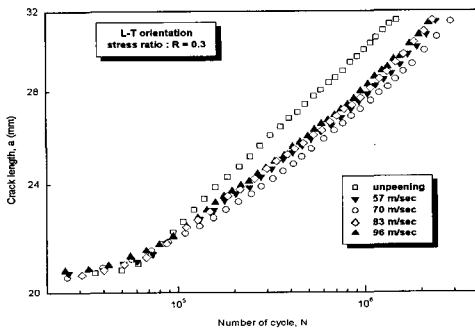


Fig. 4 Relation between crack length and number of cycle

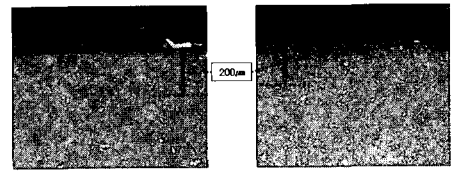
Table 5 Result of fatigue crack propagation and number of cycle

Shot velocity	da/dN (mm/cycle)	Cycle
56%	$7.201 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^6$
70%	$4.117 \times 10^{-6}$	$1.2 \times 10^6$
83%	$4.912 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^6$
96%	$5.499 \times 10^{-6}$	$9.2 \times 10^5$

3.2 쇼트볼 투사로 인한 조직변화

Fig. 5는 최적의 투사속도(70%)로 쇼트피닝가공된 시험편과 언피닝 시험편의  $\times 400$ 배의 현미경 조직사진으로, 조직관찰 전에 시험편을 폴리싱 한 후 에칭하여 조직을 관찰하였다. 언피닝재의 경우는 표면에서  $200\mu\text{m}$ 까지 조직이 조밀함이 나타나지 않으나, 쇼트피닝재는 쇼트볼 투사로 인해 표

면으로부터  $150 \sim 200\mu\text{m}$ 지점까지는 조밀하게 나타나고 국부적인 소성변형을 일으켜서 표면부에 요철현상을 형성하게 된다. 표면의 요철상태는 Table 6에 표시되어 있듯이 표면조도의 평균값(Ra)이 언피닝에 비해 쇼트피닝이 높게 나타났으며, 투사속도에 따라서는 가속할수록 더 높은 표면조도값을 나타내어 위의 사실을 뒷받침하고 있다. 그러나 속도 96%에서는 평균값이 감소하고 있는데 이는 열처리와 더불어 쇼트볼의 과도한 에너지로 인한 조직의 균일성의 의해 낮아진 것으로 판단된다.



Un-peened(a) Shot-peening (b)  
Fig. 5 Microstructures of specimen (X400)

Table 6 Surface roughness pattern of specimens

Roughness	un-peening	shot-peening			
		56%	70%	83%	96%
Ra(average value)	1.20	3.05	4.35	6.52	5.51
Ry(Maximum value)	8.8	21.1	26.9	37.6	40

3.3 응력비 변환에 따른 피로전파특성

Fig. 6은 투사속도 70%에서 가공한 쇼트피닝 시험편의 주파수 10Hz, 상온일 때 변환응력비  $R=0.1$ ,  $R=0.3$ ,  $R=0.6$ 에서 쇼트피닝 시험편의 피로균열진전속도와 응력확대계수범위  $\Delta K$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 피로균열진전길이와 하중 반복사이클과의 관계를 Fig. 7에 표시하였다. Table 7은 응력비에 따른 피로균열진전속도와 피로수명을 나타낸 것이다. 피로균열진전속도는 응력비가 증가할수록 증가하는 경향을 나타내고 있으며, 하한계 응력확대계수( $\Delta K_{th}$ )는 낮은 경향을 나타내고 있다. 이는 저응력비일수록 쇼트피닝 가

공에 의한 시험편 표면의 압축잔류응력은 피로균열전진과정에서 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 작용하여 하한계 응력확대계수가 높게 형성된 것으로 판단된다. 피로수명에 있어서는 응력비  $R=0.6$ 이  $R=0.1$ 에 비해 약 2배의 피로수명 감소현상이 나타나고 있다. 따라서 응력확대계수가 큰 구간에서는 응력비의 영향을 작게 받지만 작은 구간에서는 응력비의 영향을 크게 받아 압축잔류응력의 영향은 응력확대계수가 작고  $R=0.3$  이하의 저응력비에서 크게 나타나는 것으로 판단되었다. 쇼트피닝시험편의 변환 응력비에 따른 피로균열전진지수  $m$ 과 응력비와의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

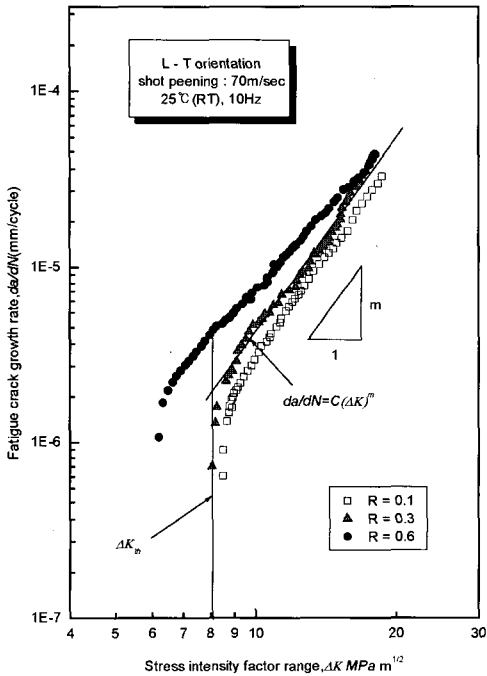


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range by stress ratio

Table 7 Result of fatigue crack propagation and number of cycle

Stress ratio	da/dN (mm/cycle)	Cycle
0.1	$4.49 \times 10^{-6}$	$1.1 \times 10^6$
0.3	$5.32 \times 10^{-6}$	$8.7 \times 10^5$
0.6	$8.59 \times 10^{-6}$	$5.3 \times 10^5$

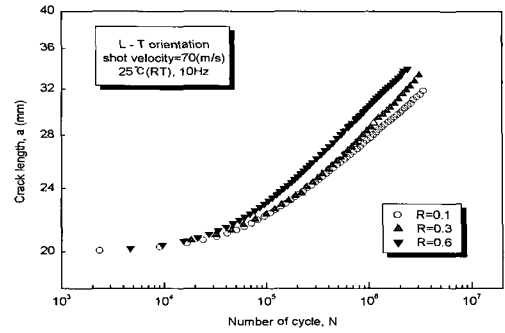


Fig. 7 Relation between crack length and number of cycle

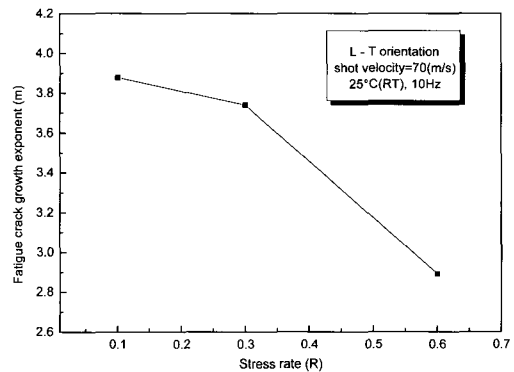


Fig. 8 Relation between fatigue crack growth exponent  $m$  and stress rate

피로균열전진지수는 Paris식  $da/dN=C(\Delta K)^m$ 의 관계를 나타내는 직선의 기울기로서 응력비가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다. 따라서 상기에 언급한 바와 같이  $R=0.3$  이상의 고응력비에서는 압축잔류응력의 구속력이 급속히 감소되는 것으로 판단되었다.

3.4 고온에서의 피로전파특성

Fig. 9는 투사속도 70%에서 가공한 쇼트피닝 시험편의 응력비  $R=0.3$  주파수는 10Hz일 때 고온환경(100°C, 150°C, 180°C)에서의 피로균열전진속도와 응력확대계수와와의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 10은 피로균열전진길이와 사이클과의 관계를 나타낸 것이다. 응력확대계수를  $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{m}$ 일때 피로균열전진속도와 균열길이 29mm지점에서의 하중반복횟수를 Table 8에 표시하였다.

피로균열진전속도는 상온에 비하여 100℃에서 41%, 150℃에서 49%, 180℃에서 53%가 가속되었고, 피로수명은 상온에 비하여 180℃일 때는 61%감소하였다. 따라서 온도가 증가할수록 시험편에 형성된 압축잔류응력의 감소로 인해 피로수명이 감소된 것으로 판단되었다. 이는 소성변형에 대한 구속력으로 작용하는 압축잔류응력의 고온에서의 소멸현상으로 인한 고온범위에서의 수명감소로 보아지며 고온에서의 압축잔류응력의 소멸크기는 뒤의 압축잔류응력의 변화에서 언급하도록 하겠다<sup>[9]</sup>.

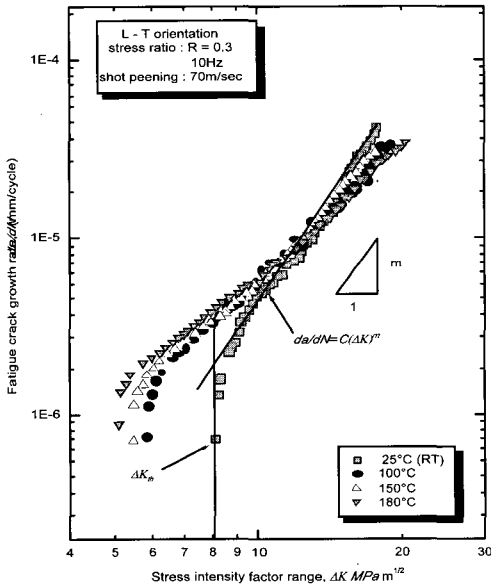


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

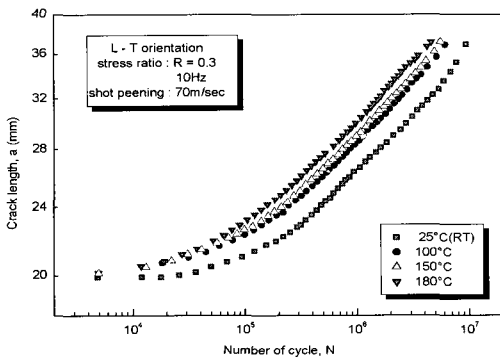


Fig. 10 Relation between crack length and number of cycle

Table 8 Result of fatigue crack propagation and number of cycle

Temperature	da/dN (mm/cycle)	Cycle
25℃	$4.117 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^6$
100℃	$5.824 \times 10^{-6}$	$8.6 \times 10^5$
150℃	$6.140 \times 10^{-6}$	$7.3 \times 10^5$
180℃	$8886.302 \times 10^{-6}$	$6.0 \times 10^5$

3.5 저온에서의 피로전파특성

Fig. 11은 각각 동일한 압축잔류응력층을 형성하기 위해 투사속도를 70%로, 응력비 R=0.3 정현파 10Hz로 저온환경(-60℃, -80℃, -100℃)에서의 피로균열진전속도와 응력확대계수와와의 그래프이다. 또한 Fig. 12는 피로균열진전길이와 사이클과의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 응력확대계수를  $\Delta K = 10 \text{MPa} \sqrt{m}$ 일 때 피로균열진전속도는 Table 9에 표시된 바와 같이 온도가 하강할수록 피로균열진전속도는 작아지는 경향이 나타내었다. 이는 온도가 저하될수록 저온취성의 영향으로 재

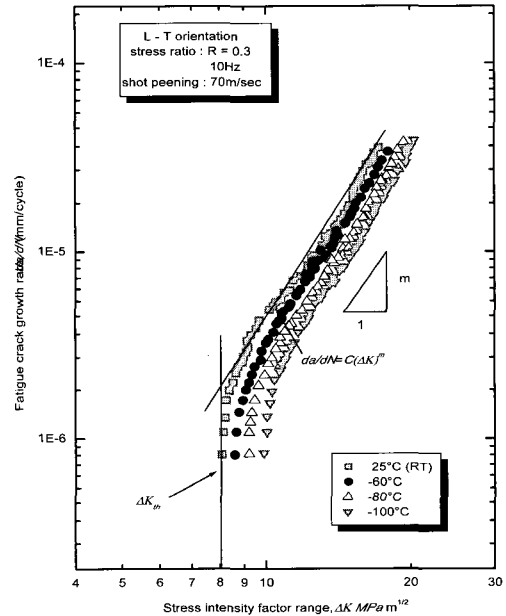


Fig. 11 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range in low temperature

료의 인성이 떨어져 재료의 피로균열저항성이 감소<sup>[10]</sup>하게 되어 응력확대계수는 증가하고, 피로균열진전속도는 감소되는 현상이 나타난 것으로 판단되었다. 따라서 피로수명은 Table 9에 보이듯이 -100℃에서는 66.6%로 온도가 하강할수록 피로수명이 감소하는 경향을 나타내었다.

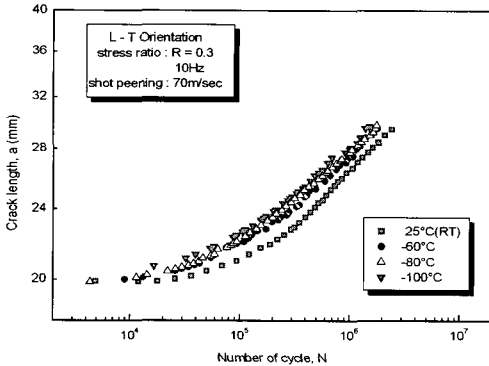


Fig. 12 Relation between crack length and number of cycle

Table 9 Result of fatigue crack propagation and number of cycle

Temperature	da/dN (mm/cycle)	Cycle
25℃	$4.9 \times 10^{-6}$	$1.5 \times 10^6$
-60℃	$3.237 \times 10^{-6}$	$1.25 \times 10^6$
-80℃	$2.178 \times 10^{-6}$	$1.05 \times 10^6$
-100℃	$1.085 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^6$

3.6 고온에서의 압축잔류응력의 변화

Fig. 13은 고온 환경(100℃, 150℃, 180℃)에서 피로균열진전시험 후 시험편의 압축잔류응력의 변화상태를 표시한 것이다. Table 10과 같이 온도가 증가할수록 최대 압축잔류응력값이 감소되는 경향을 나타내었다.

최대 압축잔류응력치에 있어서는 180℃일 때 12% 감소하였고, 시험편 겉 표면에 있어서는 24%가 감소되어 압축잔류응력의 감소현상이 현저하였다. 따라서 고온 환경에서는 부품에 쇼트피닝 가공을 하여도 그 효과가 급감하므로 사용에 있어서 제한이 따를 것으로 판단되었다.

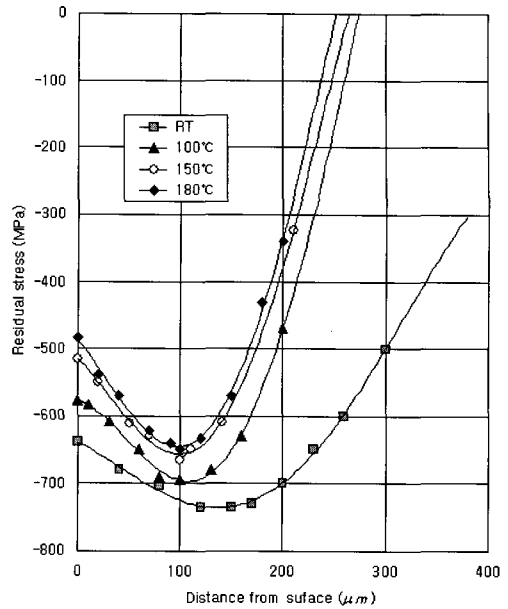


Fig. 13 Compressive residual stress distributions of specimen surface with temperature

Fig. 10 Relation between crack length and number of cycle

Temperature	Maximum value	Value of polar surface
25℃	735MPa	638MPa
100℃	694MPa	578MPa
150℃	665MPa	516MPa
180℃	650MPa	484MPa

3.7 온도변화에 따른 피로균열진전지수

Fig. 14~15는 고온(100℃, 150℃, 180℃), 저온(-60℃, -80℃, -100℃)환경에서 온도와 피로균열진전지수 m과의 관계를 나타낸 것이다. 먼저 고온환경에서는 상온과 100℃에서는 압축잔류응력의 높은 감소율로 인해 급격히 m이 감소하는 경향을 나타나고 있다. 반면 저온환경에서는 온도 하강에 따라 m이 증가하는 경향을 나타내고 있다.

Fig. 16은 본 연구의 응력비 및 고·저온환경에서의 조건이 피로균열진전식의 C와 m에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 고온 환경에서는 온도가 증가할수록 재료상수 C값은 증가하고 피로균열진

전지수  $m$ 은 감소하는 경향을 나타내었다. 반면 저온환경에서는 온도가 내려갈수록 고온 환경에서와는 반대의 경향이 나타났다. 그리고 상온에서 응력비의 영향은 재료상수  $C$ 값의 변화는 완만한 데 비해  $m$ 의 값은 크게 변하는 것을 알 수 있다.

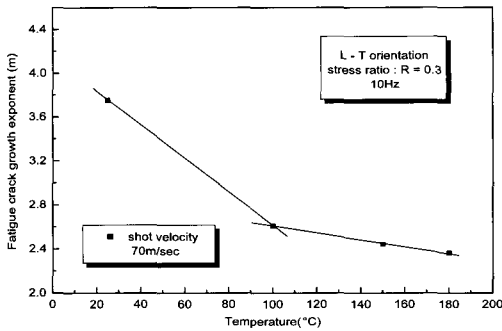


Fig. 14 Relation between fatigue crack growth exponent  $m$  and temperature(°C)

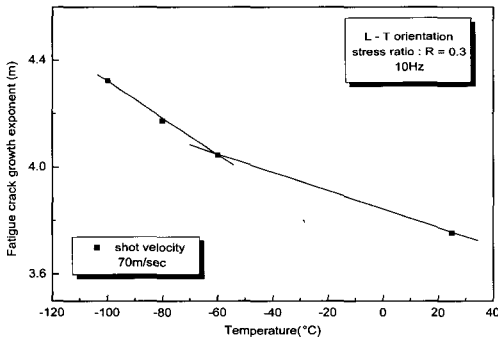


Fig. 15 Relation between fatigue crack growth exponent  $m$  and temperature(°C)

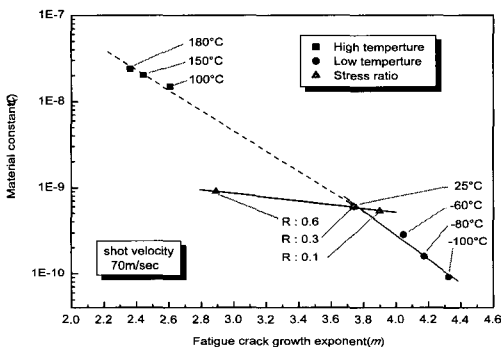


Fig. 16 Correlation between  $C$ ,  $m$  in condition of low, high temperature and stress rate  $R$

### 3.8 쇼트피닝재 및 언피닝재의 파단면 특성

Fig. 17은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM사진 촬영지점이고, Fig. 18~19는 상온에서 언피닝재와 쇼트피닝재의 파단면을 관찰한 것이다. 스트라이에이션은 모든 표면에 뒤얽힌 모양의 슬립면과 균열방향과 직각으로 형성된 연성 스트라이에이션이 생성된 것을 볼 수가 있다. 또한 언피닝 시험편의 피로균열파단면 양상관찰에서 각 지점의 피로균열진전방향과 직각으로 일치하는 스트라이에이션 방향이 형성되었다. 반면에 쇼트피닝 시험편은 압축잔응력이 균열선단을 구속하기 때문에 파단면 양쪽측면의 피로균열이 지연되어 전체적으로 라운드형으로 균열이 진전됨으로써 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향형성에 차이가 있었다. 그리고 Fig. 20~21은 고온, 저온환경에서의 피로균열파단면을 관찰한 사진이다. 먼저 고온에서의 파단면을 살펴보면 고온에서의 덩플현상의 파단면을 보여주고 있으며 스트라이에이션의 간격이 상온과 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 저온에서도 마찬가지로 파면조직상의 뚜렷한 차이를 나타내고 있다<sup>(11)</sup>.

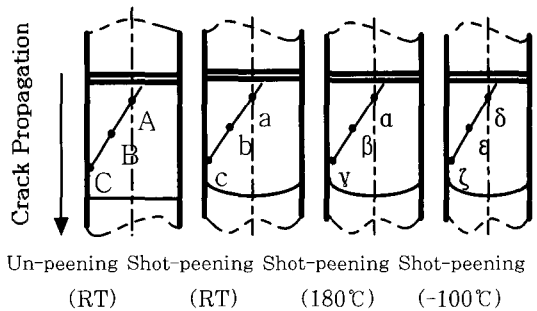


Fig. 17 Picture point of fracture surface

## 4. 결 론

스프링강에 기계적조건과 환경조건에서의 피로 균열진전시험을 실시하여 얻은 피로균열진전특성을 측정비교하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 투사속도에 따른 피로균열진전속도는 속도가 70%보다 더 가속화시킬수록 오버피닝 현상에



의해 압축잔류응력이 감소하고, 피로균열속도의 가속현상으로 이어졌다. 또한 응력비  $R=0.3$ 이하에서는 압축잔류응력이 피로균열진전거동에 영향을 주고 있지만 그 이상의 응력비에서는 압축잔류응력의 구속력이 감소되었다.

2) 피로균열진전특성은 고온환경의 경우 압축잔류응력의 감소로 인해 피로균열진전억제효과가 현저히 감소됨을 알 수 있다. 저온환경에서는 온도가 저하될수록 재료의 수축현상으로 인해 저온취성이 발생하여 피로균열저항성이 감소하는 것으

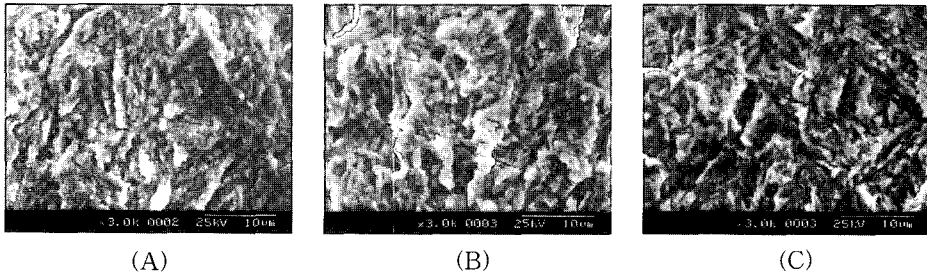


Fig. 18 Striation of fatigue crack propagation by SEM(Un-peening, RT)

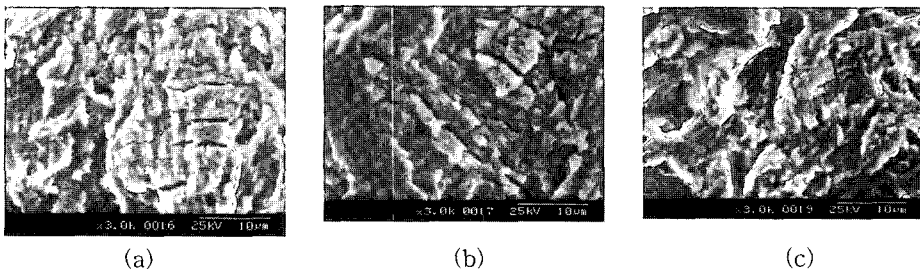


Fig. 19 Striation of fatigue crack propagation by SEM(Shot-peening, RT)

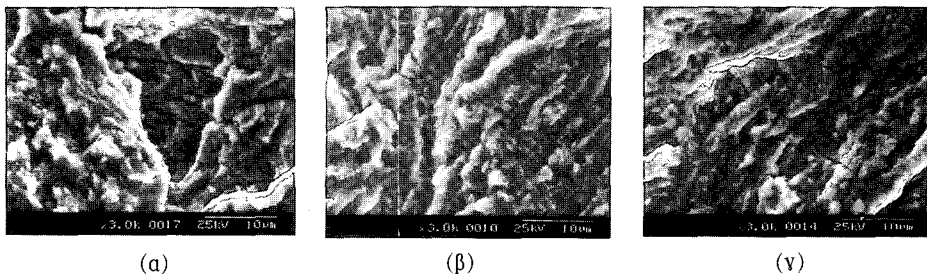


Fig. 20 Striation of fatigue crack propagation by SEM(Shot-peening, 180°C)

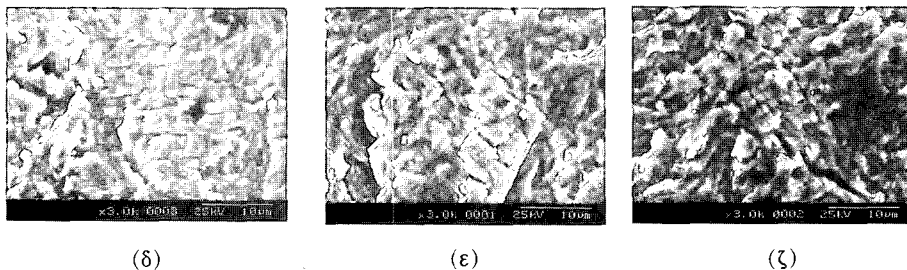


Fig. 21 Striation of fatigue crack propagation by SEM(Shot-peening, -100°C)

로 나타났다.

3) 피로수명에 있어서는 언피닝에 비해 쇼트피닝의 경우 최적의 투사속도(70%)에서 2배의 피로수명향상을 보여주었고, 고·저온에서도 쇼트피닝재가 언피닝재보다 높은 피로수명을 보여주었다.

4) 각 조건에서의 파단면을 관찰한 결과 쇼트피닝재가 언피닝재에 비해 압축잔류응력의 영향으로 인해 균열선단 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향의 차이가 있었다. 또한 고온환경에서는 압축잔류응력의 감소로 인해 피로균열선단의 진행곡선형태가 상온에 비하여 완만한 곡선형태로 관찰되었다.

### 참고문헌

- [1] K. D. Park and C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses on Fatigue Strength in DIN50CrV4-SAE9254 Steel," KCORE, Vol.15, No.3 pp.93-99, 2001.
- [2] A. Tange and 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.
- [3] ASTM, "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates," ASTM E 647-93, 1993.
- [4] H. Kobayasi, Fracture Mechanics, National Publication Corporation, Tokyo, pp.57-63, 1993.
- [5] ASTM, "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress," ASTM E 1426-94, pp.932-935, 1994.
- [6] ASTM, "Standard Test Method for Verifying The Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement," ASTM E 915-90, pp.691-693, 1990.
- [7] K. D. Park and C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel," Transactions of the KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
- [8] K. D. Park and C. G. Jung, "A Study of Development Methods of Fatigue Life Improvement for the Suspension Material," Transaction of the KASE, Vol.12, No.1, pp.196-202, 2004.
- [9] C. G. Jung and K. J. Ha, "A Study on the Characteristics of Compressive Residual Stresses at Elevated Temperature," International Shot Peening Conference, pp.25-31, 2002.
- [10] K. D. Park, T. Y. No, Y. D. Kim, J. H. Kim and J. Y. Son, "A Study on the Fatigue Crack Propagation Characteristics for Steel of Pressure Vessel A516 at Low Temperature," KCORE, Vol.13, No.3(1), pp.108-115, 1999.
- [11] J. Willenborg, R. M. Engle and H. A. Wood, "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 2월생, 1992년 일본동경공업대학 공학박사 학위취득, 1973년 3월~현재 부경대학교 기계공학부 교수

#### 유형주 (柳炯柱)



1968년 7월생, 1997년 한국기술교육대학교 생산기계공학과 졸업, 2001년 부경대학교 대학원 기계공학과 졸업(석사), 2004년~현재 부경대학교 기계공학부 대학원 박사과정, 1997년~현재 대한상공회의소 부산인력개발원 자동화기계과 교사