

# SUP9 스프링강의 쇼트피닝가공에 의한 피로수명향상과 고온환경에서의 압축잔류응력 소멸현상에 관한 연구

박경동\* · 손명균\*\*

\*부경대학교 기계공학부

\*\*부경대학교 대학원 기계공학과

## A Study of Shot peened Spring Steel for Fatigue Life Improvement and Compressive Residual Stress Disappearance on the High Temperature

KEYOUNG-DONG PARK\* MYUNG-KOON SON\*\*

\*Pukyong National University, Busan, Korea

\*\*Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Shot Peening(쇼트피닝), Residual Stress(잔류응력), High Temperature(고온), FEM(유한요소법)

ABSTRACT: The compressive residual stress, which is induced by shot peening process, seems to be an important factor of increasing the fatigue strength. And then it was showed that residual stress was disappeared at the high temperature. The fatigue characteristic study of a SUP9 spring steel processed shot peening is performed by considering the high temperature service conditions in the range of room temperature through 180°C in the range of stress ratio of 0.3 by means of opening mode displacement. The fatigue resistance characteristics and fracture strength at high temperature is considerable lower than that of room temperature in the early stage and stable of fatigue crack growth region.

### 1. 서 론

산업사회의 발전으로 기계구조물, 기계부품, 자동차, 항공기 부품, 발전기 터빈등의 기계구조물에서는 에너지와 자원절약의 목적으로 경량화에 대한 요구가 증가하고 있다. 재료의 절감을 위해서 고강도화, 경량화 설계방법의 도입이 적극 채용되고 있다.

스프링의 설계응력증가를 위해서 최근에 새로운 스프링강종이 개발되고 있으며, 개발된 스프링강종의 경도 또한 높은 설계응력에 발맞추어 증가하고 있다. 하지만 높은 인성과 경도의 증가는 가져왔지만 경도의 증가에 따른 노치 민감성에 따라 표면의 노치민감성을 낮출 수 있는 쇼트피닝가공은 더욱 중요하게 되었다.

기계부품의 파손은 대부분 반복적인 인장응력에 의하여 발생하기 때문에 사용중에 높은 인장응력을 받는 기계부품의 경우에는 표면에 압축잔류응력을 발생시켜서 인장응력을 상쇄시키는 방법으로 부품의 피로수명을 증대시킨다. 쇼트피닝은 이와 같이 기계부품의 표면에 유익한 압축잔류응력을 발생시키기 위한 방법으로 현재 자동차 및 항공기부품에 폭넓게 적용되고 있다.

서로 다른 쇼트피닝조건을 적용하여 피로강도의 효과를 연구하여 쇼트볼의 투사밀도를 높이거나, 투사속도를 높이거나, 쇼트볼의 경도를 증가시키면 피로강도가 증가함을 확인하였다.

쇼트피닝 후 잔류응력에 대한 연구결과에 있어서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 표면에서 최대값을 갖는 것이 아니라 표면아래에서 최대 값을 형성하며 최대 압축잔류응력의 양은 쇼트피닝가공조건에 따라 향상시킬 수 있다고 하였다. (Wohlfahrt, H. 1984) 또한 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로 크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로균열진전수명에 있어서 표면에 형성된 잔류응력은 매우 중요한 인자이며 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. (Tange, A. 등 1990)

쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력은 어떤 상황에 놓이게 되면 온도에 의해 잔류응력은 없어지거나 이완될수 있다. 이러한 상황은 고온 및 과대응력 상태이며, 잔류응력 소멸현상을 발생시키는 대략적인 온도는 강철은 260°C, 이고 알루미늄은 120°C이다. 고온에서의 풀림(arnealing)에 의해 압축잔류응력에 의한 이점이 제거될 수도 있다는 점이 중요하다.

본 연구는 유한요소법에 의한 CT시험편에 미치는 압축잔류응력의 영향을 평가하고, 압축잔류응력이 피로균열진전에 미치는 영향을 알아보기 위하여 CT시험편에 쇼트볼을 투사한 쇼트가공제와 투사하지 않은 연피닝제의 피로균열진전 실험실시하였다. 또한 고온환경에서의 피로균열진전에 미치는 압축잔류응

제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당동 산100

051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

력의 영향을 조사하기 위하여 RT, 100℃, 150℃ 180℃의 고온에서 실시함으로써 고온의 환경에서의 피로균열전파특성과 잔류응력의 소멸에 대하여 알아보았다.

## 2. 쇼트피닝

### 2.1 쇼트피닝의 효과

쇼트피닝은 Fig. 1 그림과 같이 쇼트볼이라는 작은 강구를 임펠러로 고속회전시켜 운동에너지를 증대하여 금속표면에 투사하는 것으로 금속표면을 강타하여 순간적으로 금속표면에 소성변형을 주고 이탈한다. 이 때 표면은 잔류압축응력이 발생하고, 내부는 잔류 인장응력이 생긴다. 이로 인한 재료의 표면은 항복점을 초과하여 영구변형을 일으킨다. 그 거동은 소성 변형에 의한 냉간 가공의 효과로 볼 수 있다. 쇼트볼이 충돌시에 잔류압축응력의 분포는 일반적으로 100~150 μm에서 최고치를 나타내며 표면에 잔류 압축응력이 발생함으로써 인장이 반복적으로 작용하면, 압축응력이 점점 감소할 때까지 피로수명이 길어진다.

쇼트피닝가공 효과는 지극히 표면에만 잔류하는 압축응력에 의한 것이므로, 탄성한계의 증가나 인성의 증가는 없다. 또한 저사이클 영역보다는 10<sup>5</sup>사이클이상의 반복되는 하중을 받는 부분에서 피로수명 연장에 효과적이다.

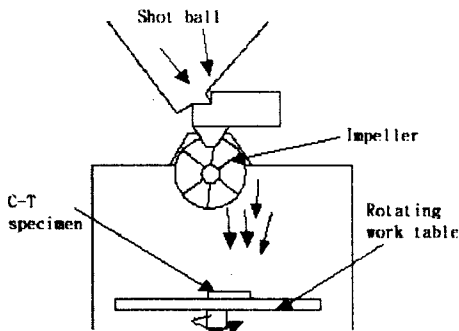


Fig. 1 Schematic diagram of Shot peening

### 2.2 쇼트피닝 강도

쇼트피닝의 강도의 평가기준은 일반적으로 알멘스트립(almen strip)의 굴곡 정도로 나타내며, 이 굴곡정도를 "Arc Height"라고 한다. 아크 하이트가 만들어지는 이유는 얇은 박판에 쇼트볼이 투사될 때 쇼트볼이 충격되는 부분에서는 표면층이 늘어날려는 성질을 가지고, 쇼트볼이 충격 되지 않은 반대 면에서는 원상태를 유지하고 있으므로 표면과 반대면 간의 인장과 압축력으로 작용하게 되어 굽어지는 데 알멘스트립은 쇼트볼 투사면쪽으로 볼록하게 된다. 이러한 아크하이트의 굴곡정도를 쇼트피닝 강도를 나타내게 된다.

쇼트피닝가공 강도 조절을 위해서는 여러 가지 변수들에는 쇼트볼의 속도, 크기, 경도, 형상, 단위시간당의 투사량 그리고 투사각도 등이 있다. 이모든 것이 적절해야만 최적의 쇼트피닝 가공 강도를 유지할 수 있다.(이승호, 김희송 1999)

## 3. 실험방법 및 장치

### 3.1 쇼트피닝가공

쇼트 피닝가공은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트 피닝기와 엔진벨브 스프링 제조용 쇼트 피닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 1과 같다. Fig. 2는 CT 시험편의 표면에 쇼트피닝가공을 위한 치구로서 쇼트피닝가공기의 회전하는 work table에 놓여진다.

Table 1 Conditions of Shot-peening

Condition	Shot- Peening
Impeller Dia	490 mm
Blades	90mm/6 pcs
Width /Q'ty	
r.p.m	2200 r.p.m
Shot-Ball Dia.	0.8 mm
Time	24 sec.
Arc Height (Alman A-Strip)	0.375 mm
Coverage	85 %

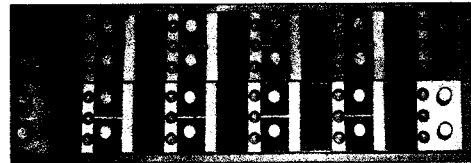


Fig. 2 Fixture of specimen

### 3.3.1 압축잔류응력측정

금속재료는 작은 결정체의 집합체이며 각 결정체는 조직적으로 배열된 원자로 구성되어 있다. 그러나 각각의 결정체는 불규칙한 방향을 갖고 있어 재료에 응력이 가해지면 그 재료의 탄성한계 내에서 응력의 크기에 비례하여 결정의 원자간 거리가 균일하게 벌어지던가 또는 줄어들든다. 따라서 그와 같은 현상에 X-선을 입사시켜 회절되어 나오는 원자를 이용해 결정면간 폭을 측정하여 응력을 산출하는 것이 X-선 잔류응력측정법이다.(Riraku 1991)



Fig. 3 Photograph of X-Ray diffraction machine

쇼트 피닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X선 잔류응력 측정기 (Fig. 3 RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 $\mu$ m 단위로 연마 해가면서 Table 2 와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 2 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
X-Ray Source	Voltage	30 KV
	Current	10 mA
	$\psi$	0°, 15°, 30°, 45°
2 $\theta$	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

### 3.3. 피로균열진전실험

#### 3.3.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연 강재 스프링강 SUP9이며, 시편의 화학적 성분은 Table 3에 나타내었고, 기계적 성질은 Table 4와 같다.

Table 3 Chemical composition (wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 4 Mechanical properties

Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (H <sub>RC</sub> )
1226	9	2.75

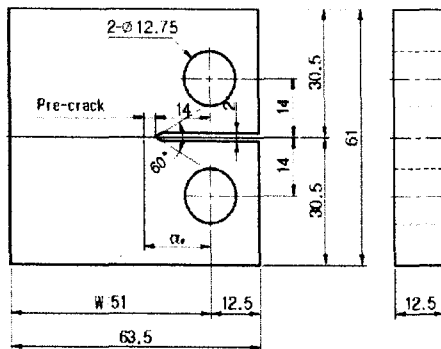


Fig. 4 Configuration of CT-specimen (unit:mm)

Fig. 4는 컴팩트(CT) 시험편으로, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용, L-T방위로 채취하여 압연방향이 하중 방향이 되게 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-93(1993)의 기준에 따라 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(wire cutting E.D.M)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.

그리고 피로균열진전의 예상경로는 그 관찰을 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며, 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도이내의 응력범위에서 ASTM(1993) E647-93 규정에 의거 3mm의 피로 예균열을 주었다.

#### 3.3.2 피로시험기

Fig. 5는 본 실험에 사용된 전기 유압식 피로시험기(INSTRON 8501, 1000KN)이며, 시험기에 연결된 컴퓨터를 이용하여 콘트롤하였다. 균열길이 측정은 시편에 COD 클립 게이지를 부착하여 Compliance법을 사용하였다.



Fig. 5 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8501)

#### 3.3.3 피로균열진전시험

실험은 서보전기 유압식 피로시험기를 사용하여 하중감소 제어방식으로 주파수 10Hz, 정현파형으로 하였다.

고온장치로는 전기유압식 피로시험기에 챔버를 부착하였으며, 온도유지는  $\pm 1^\circ\text{C}$ 로 유지하였고 응력비  $R=0.3$  10Hz, 실험온도는 25℃ 와 100℃, 150℃, 180℃의 고온으로 하였다.

실험해석을 하기 위해 응력확대계수 $\Delta K$ 는

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

및 응력비

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

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의  $\Delta K$ 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인(Paris and Erdogan, 1963)

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

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일재료, 동일환경 구조물 등의 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다. 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 는 다음 식에 의해서 나타낸다. 본 시험에서는 ASTM (1997) E647-95a 규정에 의거  $\Delta K$  콘트롤에 의한 K-감소방식을 이용하였는데 그 감소조건은 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 측정범위  $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$

### 3.4 유한요소해석

#### 3.4.1 유한요소모델

CT시험편 양쪽표면에 존재하는 압축잔류응력이 피로균열진전전파거동에 미치는 영향을 조사하기 위하여 실험조건과 같이 경계조건을 주어 각각의 경우의 시험편에 발생하는 응력의 변화를 알아보았다. 실험에 사용된 시험편의 형상을 유한요소 상용 코드를 이용하여 Fig. 6과 같이 CT시험편을 하중/형상이 대칭이므로 해석대상의 1/2을 모델링 하였다.

유한요소모델(Finite element model)에는 8절점의 솔리드 요소(8-node 3D structural element)를 사용하였다. Table 5에 모델의 Simulation data와 재료의 물성치를 나타냈다.

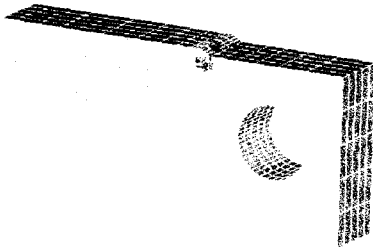


Fig. 6 Finite element half model of CT specimen

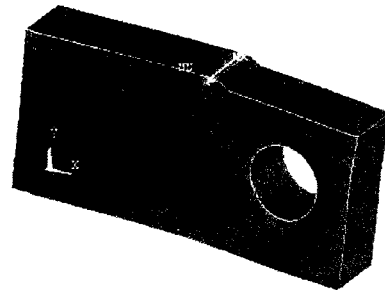
Table 5 Simulation data for FEM simulation and material property data

Simulation data	
Element mode	3-D structural solid element (8-node)
FEM program	ANSYS Ver 5.6
Node	7715
Element	5740
Material property data	
Young' modulus	215800 MPa
Poisson's ratio	0.39

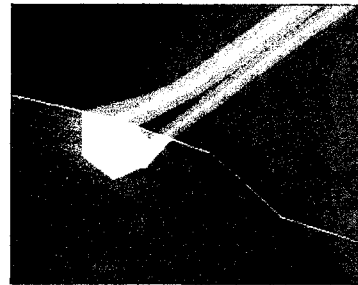
유한요소법에 의해 계산된 결과는 모델링을 구성하는 Mesh의 형태와 크기, 그리고 비율에 따라 많은 차이를 나타낸다. 유한요소법에서 촘촘한 mesh가 항상 정확한 결과를 계산하지 못한다. 오히려 계산결과가 발산하여 오차범위가 더 커질 수도 있을뿐만 아니라 계산과정이 지나치게 오래 수행되는 단점이 발생된다. 반면에 지나치게 성글게 mesh를 만들면 계산과정은 단축되지만 필요한 지점에서의 계산결과를 얻지 못할 수 있다. 이 때문에 적합한 mesh를 결정하는 것이 중요하다.(김경수등, 2002)

#### 3.4.2 유한요소해석결과

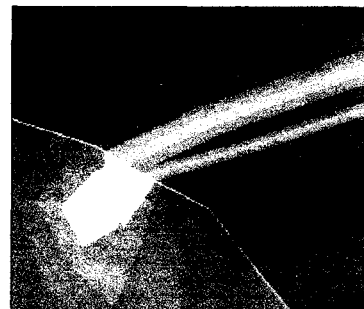
Fig. 7은 유한요소해석 결과를 전체모델과 unpeened와 shot peened의 최대응력부근의 응력분포를 나타내고있다. 그림(a)에서 볼수 있듯이 균열선단부근의 응력분포가 집중되어 있고, 그림(b)와 (c)를 비교하여 보면 시험편 표면에 압축잔류응력을 부여된 그림(b)는 unpeened재 그림(c) 표면에서의 응력분포와 달리 시험편 표면에서의 응력집중이 감소되어졌음을 볼수 있다. 이는 CT시험편 양 표면에 존재하는 압축잔류응력이 시험편 표면에 발생하는 응력을 저하시키는 역할을 한것으로, 이것은 시험편 균열의 개폐의 억지력으로 작용되어 피로균열진전전파거동 및 피로수명에 영향을 미치는 것으로 생각된다.



(a) stress distribution for the total model



(b) stress distribution around the area with maximum stress of unpeened result



(c) stress distribution around the area with maximum stress of shot peened result

Fig. 7 Finite element method result

Fig 8은 유한요소법에 의한 해석의 결과치로서 unpeened 모델과 CT시험편 양쪽 표면에 압축잔류응력을 부여하고 해석한

shot peened 모델과의 최대응력값을 비교하여 나타내고 있다. 그림은 unpeened재와 shot peened재의 최대응력값은 차이를 나타내고 있으며, 또한 각 온도에 따른 응력결과값으로 온도가 상승할수록 압축잔류응력의 감소로 인하여 시험편에 발생하는 응력값이 온도의 상승에 따라 조금씩 증가하는 경향을 보여주고 있다.

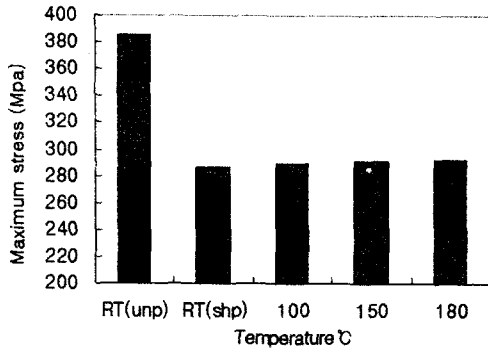


Fig. 8 Finite element model of CT specimen

## 4. 실험 결과 및 고찰

### 4.1 피로균열진전전파 특성

#### 4.1.1 unpeened재와 shot peened재의 피로균열전파특성

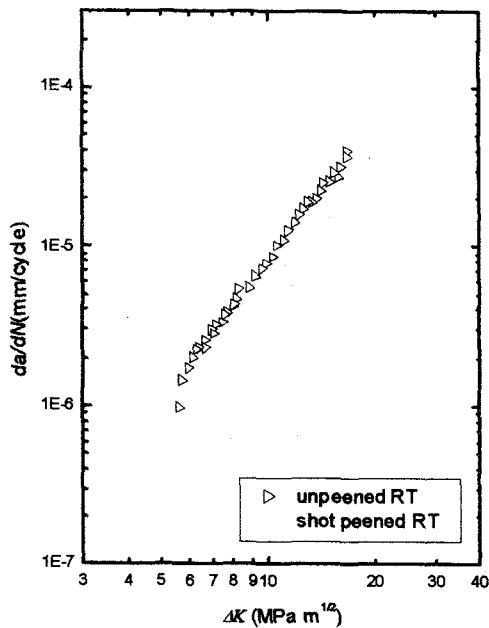


Fig. 9 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 9는 응력확대계수 범위  $\Delta K$ 와 피로균열진전속도  $da/dN$ 과의 관계를 나타낸 그래프이다. Fig. 9에서 볼수 있듯이 unpeened 재의 경우  $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는  $2.5 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 성립되었고, Shot peened 재의

경우는  $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다. shot peened재 경우 시험편 양쪽 표면에 형성된 압축 잔류응력에 의하여 인장압축반복 작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력이 피로균열진전에 작용함으로써 피로균열진전속도  $da/dN$  지연에 영향을 미친 것으로 생각된다.

이 영향으로 인하여 shot peened재가 unpeened재에 비해 하한계응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 상승하는 것으로 나타났다.

#### 4.1.2 고온환경에서의 피로균열전파특성

Fig. 10을 보면 온도의 상승과 더불어  $da/dN-\Delta K$ 의 양대수 직선관계는 저하되어 상온에서  $4.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , 100°C의 경우가  $2.3 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , 150°C의 경우  $2 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ , 180°C의 경우  $1.7 \times 10^{-6} \text{ mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립하였다.

이를 보면 온도의 증가에 따라 속도가 가속하여 양대수 직선 성립구간이 저하하는 경향으로 나타났다. 이 영향으로 인하여 하한계응력 확대계수  $\Delta K_{th}$ 가 감소하는 것으로 나타났다.

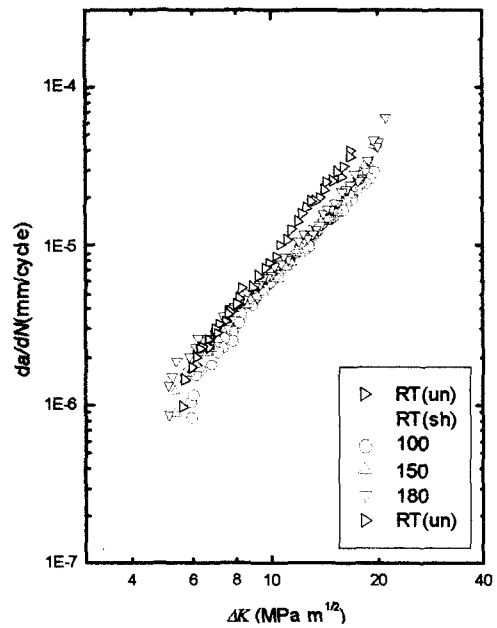


Fig. 10 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Table 6은 하한계응력확대계수  $\Delta K_{th}$ 와 피로균열진전과정의 제 2단계 영역에 있어서  $da/dN-\Delta K$ 는 양대수 선도상에서 직선 관계로서, 이것을 Paris식  $da/dN = C(\Delta K)^m$ 에 대입하여 구한 각 온도에 대한 균열진전지수  $m$  및 재료상수  $C$ 를 Table 6에 나타냈다.

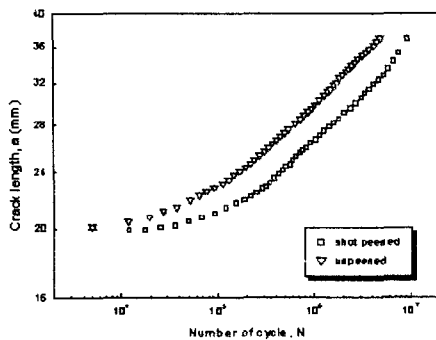
**Table 6** Experimental Constants by  $da/dN = C(\Delta K)^m$  for the Fatigue Crack Growth

	$\Delta K_{th}$	m	C
RT(un)	5.6	2.592	$2.21 \times 10^{-8}$
RT(sh)	8.08	3.774	$6.93 \times 10^{-10}$
100°C	5.79	2.607	$1.5 \times 10^{-8}$
150°C	5.44	2.44	$2.01 \times 10^{-8}$
180°C	5.06	2.36	$2.4 \times 10^{-8}$

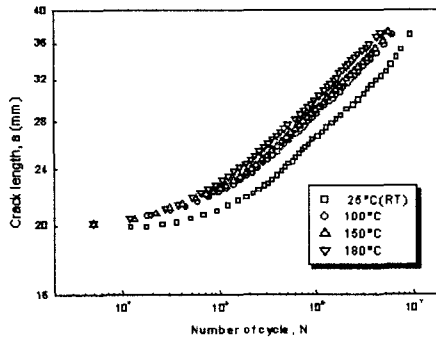
#### 4.2 크랙길이의 사이클수의 관계

Fig.11은 쇼트피닝가공하지 않는 unpeened 재와 쇼트피닝가공재의 크랙길이 a와 반복 사이클 수(N)의 관계를 나타내며, 크랙길이 28mm지점에서 하중가진횟수는 unpeened 재의 경우  $N=619,824$ 회, 쇼트피닝의 경우  $N=1,222,120$ 회로서 약 2배의 피로수명향상이 있었다.

또한, RT, 100°C, 150°C 및 180°C에서 시험한 각 온도에서의 크랙길이 a와 반복 사이클 수(N)의 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 상온보다는 온도가 상승할수록 반복횟수가 감소함을 나타냈고 전체적으로 동일한 경향을 나타내었다. 이는 상온에 비해 고온에서의 잔류응력의 소멸현상으로 인한 균열진전의 억지력의 감소를 나타내며 온도영향에 의한 수명의 감소로 보아진다.

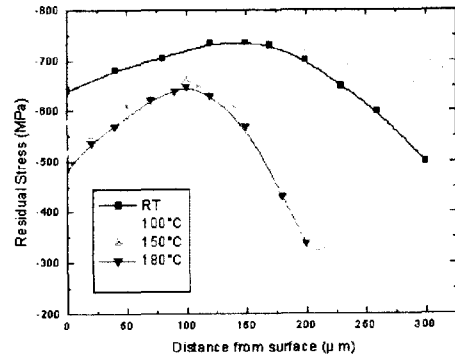


**Fig. 11** Relations between crack length and number of cycle



**Fig. 12** Relations between crack length and number of cycle

#### 4.3 압축잔류응력의 분포



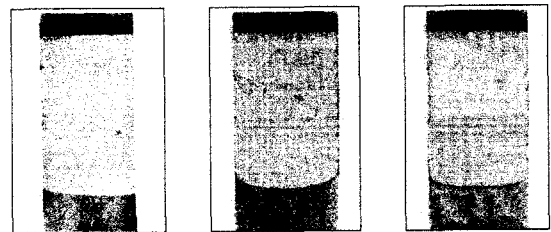
**Fig. 13** Compressive Residual Stress Distributions Produced by Shot-Peening

Fig. 13은 쇼트피닝 쇼트볼을 시험편 표면에 투사하여 얻어진 압축잔류응력치를 깊이별로 조사한 그래프로서 상온에서의 압축잔류응력치와 각각의 온도의 환경에서 피로균열진전 시험 후 시험편에 남아있는 잔류응력치를 비교하여 보여주고 있다.

온도가 상승할수록 상온에 비해 잔류응력이 낮게 나타났으며, 압축잔류응력은 상온환경에 비하여 고온환경 100°C에서 6%, 150°C에서 12%, 180°C에서 14%정도 소멸되었다. 이는 고온의 온도환경에 의한 시험편표면의 잔류응력이 소멸되었음을 보여준다.

#### 4.4 시험편의 파단면

Fig. 14는 CT시험편 파면의 실물사진이고 Fig. 15는 (a)unpeened과 (b)shot peened, 그리고 180°C 시험후의 시험편의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.



unpeened(RT) shot peened(RT) shot peened(180°C)

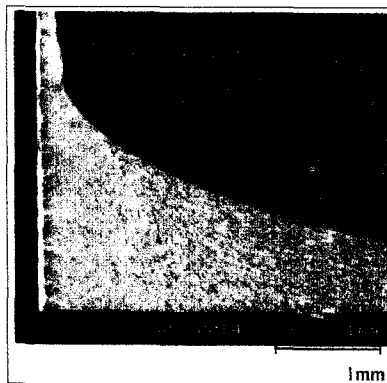
**Fig. 14** Fracture surface of CT Specimen

쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로써 피로균열진전이 지연되는 현상이 관찰되었고, Fig. 15 (b), (c)에서 비교하여 볼수 있듯이 쇼트피닝 시험의 상온환경 피로균열진전 파면과 고온환경 피로균열진전 파면의 양상이 잔류응력 소멸된 형태를 나타냈으며 균열선단 소성영역에 대한 구속력인 잔류응력이 소멸됨으로 균열진전의 지연이 효과가 감소하고 있는 것이 균열선단 표면부에 나타난것으로 관찰되었다.

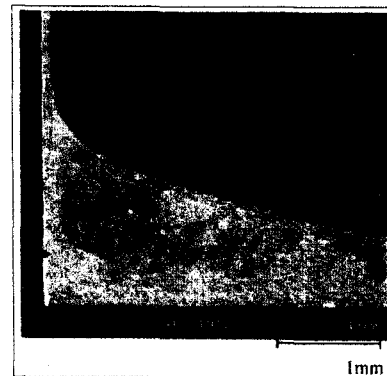
서의 크랙전파속도, 크랙전파 특성 및 하한계 응력확대계수를 측정하여 다음과 같은 결과를 얻었다.



(a) unpeened(RT)



(b) shot peened(RT)



(c) shot peened 180°C

Fig. 15 SEM Photographs of fracture surface

## 5. 결 론

스프링강 SUP9에 대하여 unpeened재와 쇼트피닝으로 압축잔류응력이 형성된 shot peened재의 CT시험편에 대하여 응력비 R=0.3로 RT, 100°C, 150°C, 180°C의 고온에서 크랙전파 특성시험을 실시하여 스프링강의 쇼트피닝의 피로수명 향상과 고온에

(1) 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력은 피로균열진전에 구속력으로 작용하여 재료에 작용하는 최대응력치를 감소시키고, 피로균열진전속도를 감소시키는 역할을 하여 하한계응력확대계수가 상승하였다.

(2) RT~180°C까지의 고온에서  $da/dN$  와  $\Delta K$ 와의 관계에서 RT  $da/dN \geq 4.3 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$  에서 180°C  $da/dN \geq 1.7 \times 10^{-6} \text{mm/cycle}$ 까지로 양대수직선 관계가 성립하다가 급격하게 감소하여 온도의 영향을 나타내었다.

(3) 고온의 경우 하한계 응력확대계수는 25°C에서 100°C까지는 직선적으로 감소하여 100°C 이상부터는 급격하게 감소함을 보였다.

(4) 크랙길이와 반복횟수의 관계에서 Unpeened재에 비해 shot peened재가 약2배의 피로수명의 향상이 있었으며 온도가 상승함에 따라 크랙길이의 증가에 따른 반복횟수는 급격하게 감소하였다.

(5) 쇼트피닝가공에 의해 형성된 압축잔류응력에 의한 피로수명의 향상은 고온의 영향에 의해 상당한 감소를 나타냈다. 이는 고온의 환경에서의 잔류응력의 소멸에 의하여 피로균열진전의 역지력이 감소되어진 것으로 생각되어진다. 고온환경에서의 피로수명에 미치는 여러인자의 영향이 더 있는 것으로 생각되며, 향후 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 김경수등 (2002), "유한요소법을 이용한 피로하중을 받는 균열 선단의 소성영역크기에 대한 연구", 한국해양공학회지 2002 춘계학술대회논문집, pp 151-154.
- 이승호, 김희송 (1999). "스프링강의 피로거동에 미치는 2단쇼트피닝의 효과", 대한기계학회논문집A권, 제23권 제1호, pp 144-147
- Riragu (1991) X-ray Stress Analyzer Manual, pp.9-17
- Tange. A. and Takamura, N (1990). "Relation between Shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel", Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, 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, Chicago, pp 316~331.