

# 스프링강의 파괴인성에 미치는 쇼트피닝 효과에 관한 연구

## A Study on Effect of Shot Peening on Fracture Toughness of Spring Steel

하경준 · 박경동  
K. J. HA, K. D. PARK

**Key Words** : Shot Peening(쇼트 피닝), Compressive Residual Stress(압축 잔류응력), Plain Strain Fracture Toughness(평면변형 파괴인성KIC)

**Abstract** : Recently, the steel parts used at the aerospace and automobile industries are required to be used light weight parts. Therefore, used material, steel have to be a high stress, which is an indispensable condition in this field. At the consideration of parts design, high hardness of the lightweight parts have an benefit of saving fuel and material. A high stress of metal has a point of difference according to the shape of design, external cyclic load and condition of vibration. A crack generates on the surface of metal or under yield stress by defect of inner metal defect or surface defect and slowly, this crack grow stable growth. Finally, rapidity failure phenomena is happen. Fatigue failure\_phenomena, which happen in metal, bring on danger in human life and property. therefor, anti-fatigue failure technology take an important part of current industries Currently, the shot peening is used for removing the defect from the surface of steel and improving the fatigue strength on surface. Therefore, this paper investigated the effect on fracture toughness using shot peening which is improve the resistance of crack growth and crack expansion rate by fatigue that make a compressive residual stress on surface.

### 1. 서 론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등 에서 필요한 철강소재분야에서 대체 재질개발과 재료의 고응력화에 대한 연구가 절실히 요구되고 있지만 생산성과 같은 경제적인 측면과 환경보호 측면에서 많은 문제점을 갖고 있으므로 그것에 상응하는 기술개발은 매우 중요한 사항이 되고있다<sup>1)</sup>. 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화는 부품의 경량화를 실현시킴으로써 재료와 연료절감이라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속내부의 결함에 의해 항복응력

이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정 성장하여 최종적으로 급속파괴되는 현상이 발생된다<sup>2)</sup>. 이와 같이 금속에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으므로 현재와 같이 대형화된 산업기술사회에 피로파괴의 방지기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다<sup>3)</sup>. 특히 각종 기계, 항공기, 자동차등의 경량화를 실현시키기 위해 사용되는 철강재의 고응력화가 요구되는 현 시점에서는 철강재 내부에 피로파괴의 원인이 되는 비금속 개재물이 존재치 않아야 하고 철강재 표면에는 탈탄이 없어야 하는 것이 필수적인 사항으로 지적되고 있다<sup>4)</sup>.

이와 같이 피로강도 저하의 인자 중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재의 표면부위의 결함이기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 가공방법으로 쇼트피닝 가공이 널리 쓰이고 있다. 최근 신소재 개발로 인한 피로강도의 최적화를 위한 쇼트피닝 가공조건을 선택하려는 연구가 진행되고 있으며, 현재 쇼트피닝 가공의 연구

---

접수일 : 2003년 4월 10일  
 하경준(책임저자) : 부경대학교 기계공학과 대학원  
 E-mail : hkj622@hanmail.net Tel. 016-587-9816  
 박경동 : 부경대학교 기계공학부

는 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.

쇼트피닝 가공은 수많은 양의 쇼트볼을 일정한 속도로 금속표면에 투사하는 것으로서, 쇼트볼에 의해 타격된 금속 표면은 요철면을 이루게 되고, 요철의 깊이는 대개 0.13~0.16 mm 정도이며, 표면은 소성 가공에 의한 가공경화층과 압축잔류응력층을 형성하게 된다. 표면의 가공경화는 피로강도에 영향을 주지 않지만 표면에 형성된 압축잔류응력은 피로강도에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히 금속표면에 압축잔류응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 압축잔류응력층은 금속 표면에서 최대값을 갖는 것이 아니라 표면아래에 형성하게 되지만 압축 잔류응력층이 표면부 가까이에 형성되고 최대값이 클수록 피로강도는 향상된다.

이와 같이 쇼트피닝 가공에 대한 연구의 중요성이 인식되어 쇼트피닝 가공조건, 쇼트볼 선정, 압축 잔류응력, 피로강도, 피로수명 등 다양한 연구<sup>5, 6)</sup>가 진행되고 있으나 국내에서는 쇼트피닝 가공에 의하여 형성되는 금속표면부의 압축잔류응력에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 쇼트피닝 가공에 의해 형성된 금속표면부의 압축잔류응력이 고강도화에 미치는 파괴역학적 기구를 정량적으로 분석하기 위해 스프링강의 표면부에 쇼트피닝 가공을 시행하여 압축잔류응력을 측정하고 이러한 압축잔류응력이 파괴인성 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하였다.

## 2. 시험재료 및 방법

### 2.1 시험재료

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 및 철도차량 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JIS G SUP-9)이며, 재료의 화학적 성분은 Table 1에 표시하였고, Fig. 1은 쇼트피닝을 하기 전 스프링강을 열처리(quenching & tempering)한 모식도를 나타내고 있으며, 기계적 특성을 규명하기 위한 인장시험편은 KS B-08의 규격으로 가공하였다.

Table 1 Chemical compositions of specimen (wt%)

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

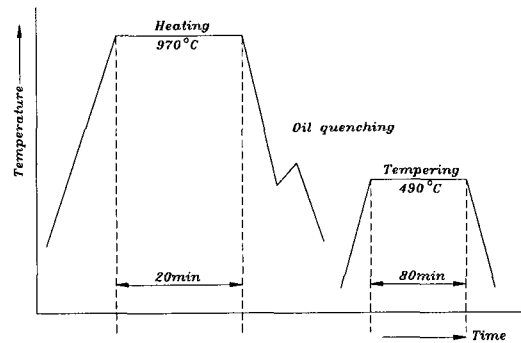


Fig. 1 Conditions of heat treatment

### 2.2 쇼트 피닝

완성된 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전터어빈식 쇼트피닝기에서 Table 2와 같은 조건으로 시험편 표면에 쇼트피닝 가공을 실행하였다. 사용된 쇼트볼은 0.8 mm로 선정하였으며 쇼트볼 투사속도는 70 m/s로 하였다. 쇼트피닝 가공 품질조건에서 커버리지는 95 %를 유지하였으며 아크하이트 수준은 쇼트볼 투사속도 70 m/s에서 0.39 mm의 아크하이트 조건이 형성되었다.

Table 2 Conditions of shot peening

Specimen	Impeller diameter (mm)	Shot velocity		Shot ball diameter (mm)	Arc-height (mm)
		(m/s)	(rpm)		
JISG SUP-9	490	70	2200	0.8	0.39

### 2.3 조도 및 경도측정

쇼트피닝가공면의 요철상태를 조사하기 위해 표면 조도계(KOSAKA, Surfacerder SEF-30D)를 이용하였다. 측정 칩의 선단반경은 2 μm를 선택하여 측정하중은 1g으로 하고 종배율은 1000배, 횡배율은 50배로 하였다. 그리고 쇼트피닝가공에 의하여 형성된 압축잔류응력층의 경도분포를 조사하기 위하여, 경도측정은 마이크로 비커스경도계(Micro Vickers, MOK-E3)를 이용하였다. 측정하중은 시편표면으로부터 20 μm 깊이까지는 25 g을 적용하였고, 150 μm 깊이까지는 300 g을 적용하여 측정하였다.

### 2.4 압축잔류응력 측정

시험편 표면에 형성된 압축잔류응력측정은 X-선 잔류응력측정기(RIGAKU-MSF2M)를 이용하였고, 측정은 20 μm 깊이단위로 전해연마를 실행하면서 Table 3과 같은 조건으로 측정하였다. 측정

계산방법은  $2\theta - \sin^2\psi$  법을 이용하여  $\psi$ 를  $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 로 변화시키면서 이때 발생하는 회절 X-선을 검출기가  $140^\circ \sim 170^\circ$ 범위에서 주사를 하여  $\psi$ 방향의 회절각을 측정하였다.

Table 3 Measuring condition of residual stress

X-Ray diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
Voltage	30kV	
Current	10mA	
$\psi$	$0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$	
$2\theta$	$140^\circ \sim 170^\circ$	
Diffraction	Scintillation counter	

2.5 파괴인성 시험

Fig. 2는 파괴인성시험에 사용한 시험기로 MTS model 810, 10 톤 용량의 컴퓨터제어 서보유압식 피로시험기를, Fig. 3은 시험에 사용된 시험편의 형상과 치수를 나타내었다. 파괴인성 시험은 ASTM E399에 의거하여 CT(1/2T) 시험편으로써  $W=51$  mm,  $B=12.5$  mm이며 초기 노치길이  $a$ 와 시험편의 폭  $W$ 의 비( $a/W$ )는 0.50으로 하였다. 시험편의 채취는 열간압연된 플랫폼 상태에서 L-T방향으로 채취하였으며, 노치의 슬로터 가공은 와이어 커팅머신에 의하여 가공한 후 표면을 그라인딩 머신으로 연마하였다.

예균열의 조건은 주파수 15 Hz, 정현파로 노치선단에서 1.5 mm 삽입하였으며  $K_{IC}$  시험은 크로스헤드 스피드 0.05 mm/min으로 상온에서 시험하였다.

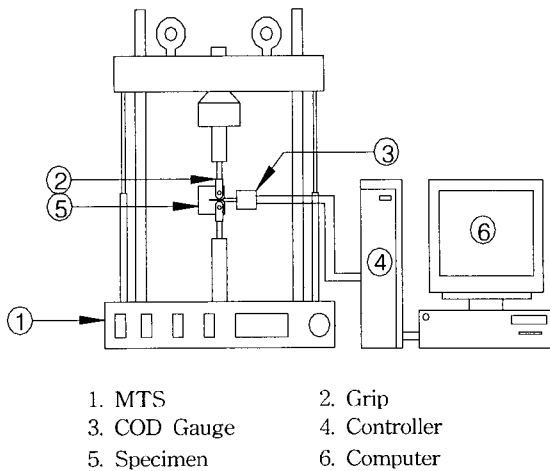


Fig. 2 Schematic diagram of tester machine

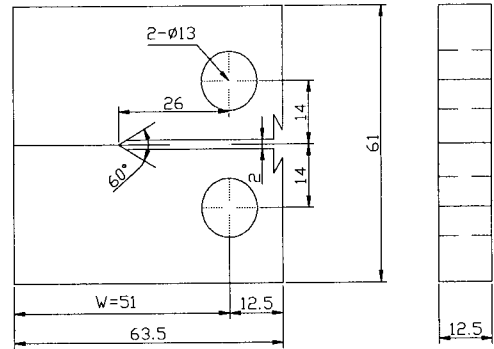


Fig. 3 Fracture toughness test specimen

3. 시험결과 및 고찰

3.1 인장시험 결과

Table 4는 열처리후의 스프링강의 인장시험결과를 나타내고 있다. 열처리되기 전의 최대인장강도는 656 MPa, 열처리 후의 인장강도는 1226 MPa로서 약 87 % 정도 향상된 것을 알 수 있었으며, 이렇게 열처리 된 시험편에 대하여 쇼트피닝을 실시하여 쇼트피닝 전후의 시험편에 대해서 각각 인장시험을 한 결과 인장강도의 변화는 없었다.

Table 4 Mechanical properties of specimen

	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)
before heat treatment	656	580	11
after heat treatment	1226	1079	9

3.2 압축잔류응력의 측정

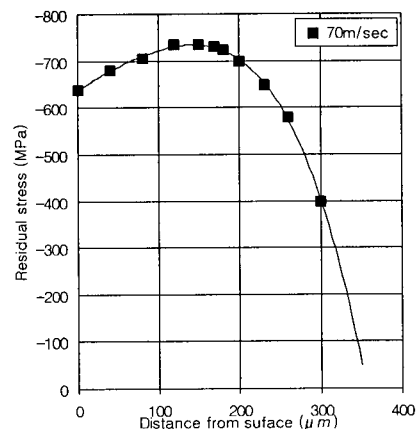


Fig. 4 Residual stress distribution on distance from surface

Fig. 4는 깊이별 압축잔류응력과 쇼트볼 투사속도와의 관계를 나타내고 있다. 압축잔류응력의 최대치와 그 형성 깊이는 150  $\mu\text{m}$ , 735 MPa로 측정되었다. 또한 표면의 잔류응력치는 678 MPa로서 표면부의 압축잔류응력은 최대값보다 100~170 MPa 정도 적게 관찰되었다. 지나친 쇼트볼 투사속도 가속에 의해 발생하는 과도한 투사에너지의 영향으로 피가공물의 압축잔류응력치를 감소시키는 오버피닝 현상으로 판단된다.

### 3.3 표면조도와 경도 분포

Fig. 5는 쇼트피닝 가공에 의하여 형성된 시험편 표면의 조도를 측정하여 연피닝시험편의 표면조도와 비교하였다. 표면조도 측정은 2.5 mm 구간을 굴곡의 중심선 산술평균값( $R_a$ )과 굴곡의 최대값( $R_y$ ), 10점 평균거칠기( $R_z$ )로 나타내었다.

쇼트피닝을 하지않은 연피닝시험편에서는  $R_a$ 가 1.2  $\mu\text{m}$ ,  $R_y$ 가 8.8  $\mu\text{m}$ ,  $R_z$ 는 8.8  $\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 쇼트피닝 가공 시험편의 표면조도는  $R_a$ 가 4.35  $\mu\text{m}$ ,  $R_y$ ,  $R_z$ 가 각각 26.9  $\mu\text{m}$ 로 측정되었다. 이와 같이 표면조도의 평균값( $R_a$ )는 연피닝에 비하여 쇼트피닝 가공시험편이 높은 수치로 측정되었다. 이것으로 볼 때 쇼트볼의 투사속도를 가속시킬수록 표면조도의 평균값( $R_a$ )은 증가할 것으로 생각된다. Fig. 6은 쇼트피닝 가공을 하지 않은 연피닝시험편의 단면과 쇼트피닝 가공한 시험편의 단면에 대한 경도분포를 비교하여 도시하였다. 압축잔류응력이 형성되지 않은 연피닝 시험의 단면 경도는 평균 453  $H_v$ 로서 표면에서 내부까지 변화가 없었고, 압축잔류응력이 형성된 쇼트피닝 가공 시험편의 단면에 대한 경도분포는 극표면에서  $H_v=465$ , 40  $\mu\text{m}$  깊이에서  $H_v=457$ , 80  $\mu\text{m}$  깊이에서  $H_v=455$ , 140~200  $\mu\text{m}$   $H_v=452$ , 200  $\mu\text{m}$  깊이 이후는  $H_v=456$ 으로 나타나고 있다. 이와 같이 시험편의 표면부에서 100  $\mu\text{m}$ 까지의 경도가 높게 형성되고 있는 현상은 앞서 고찰된 바와 같이 쇼트볼 투사에너지에 의하여 시험편 표면의 조직을 조밀하게 형성시킴으로써 경도치가 시험편 내부보다 약간 높은 수치로 관찰되고 있으나 전체적으로는 경도의 큰 변화는 없다고 판단한다. 이것은 경도가 높은 재료에 쇼트피닝 가공을 할 경우 경도의 차이가 크지 않지만, 연질재료에 쇼트피닝을 할 경우는 표면의 경도가 높게 형성된다는 보고와 일

치하였다.

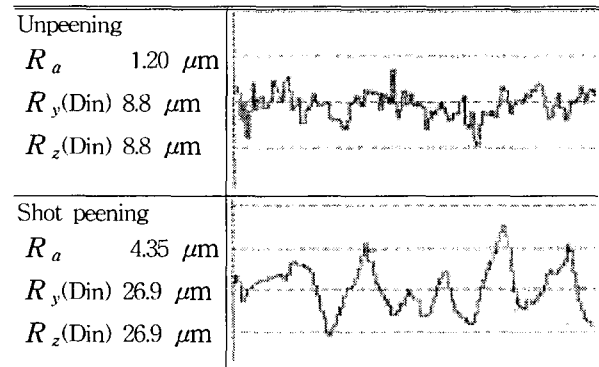


Fig. 5 Profile of surface roughness pattern

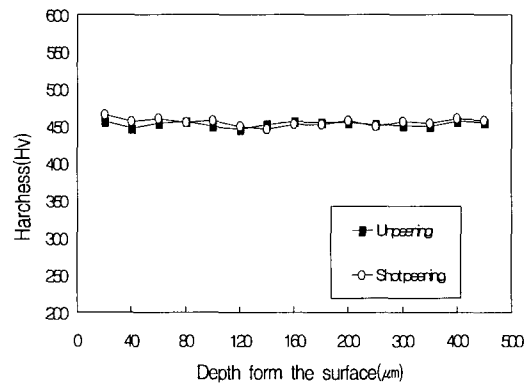


Fig. 6 Hardness distribution of specimen

### 3.4 파괴인성 특성

파괴인성 실험시 사용한 시험편은 각각 3개의 시험편을 사용하였으며 각 재료에 대한 파괴인성치의 계산은 아래 식 (1)에 의해 계산하였다.

$$K_{Ic} = \frac{P_Q}{B_w^{1/2}} f(a/w) \quad (1)$$

$$f(a/W) = (2 + a/W)(0.866 + 4.64a/W - 13.32 a^2/W^2 + 14.72 a^3/W^3 - 5.64 a^4/W^4)/(1 - a/W)^{2/3}$$

여기서,

$P_Q$  : 하중(kN)

$B$  : 시험편의 두께(mm)

$W$  : 시험편의 폭(mm)

$a$  : 균열길이(mm)

시험결과 파괴인성치( $K_{Ic}$ )는 ASTM E399에서 규정된 하중조건과 두께규정( $B$ ,  $a$ )인 아래 식(2)와 (3)을 잘 만족하였으므로 파괴인성값으로 규정

하였다.

$$P_{max} / P_{min} < 1.10 \quad (2)$$

$$B, a \geq 2.5 (K_Q / \sigma_y)^2 \quad (3)$$

위 식에 의해 계산되어진 파괴인성 실험 결과를 unpeening의 경우 Fig. 7에 나타내었고 peening의 경우를 Fig. 8에 나타내었다. 실험결과에서 보면 unpeening재의 파괴인성값은  $101.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$  peening재의 파괴인성값은  $78.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 로 unpeening재에 비해 unpeening재의 파괴인성값이  $23.3 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 로 낮게 나왔다는 것을 알 수 있다. 이는 본 소재와 같이 고강도강의 경우 shot peening에 의해 표면 경화와 압축잔류응력이 생성되어 피로수명의 경우 peening에 의해 증가한다고 보고되고 있으나 파괴인성 시험의 경우 예비크랙에 의해 크랙 선단부분의 응력이 완화되어 있는 상태에서 대규모 항복을 동반하는 파괴인성 실험을 실시하면 인장잔류응력의 영향은 사라지고 표면경화에 의해 오히려 취성파괴를 유도함으로써 파괴인성값이 저하한다고 생각된다. Table 5에 Fig. 7과 Fig. 8의 결과를 정리해서 나타내었다.

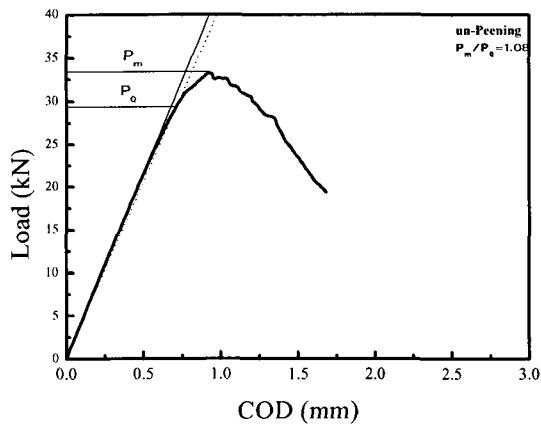


Fig. 7 Relations between load and COD in unpeening

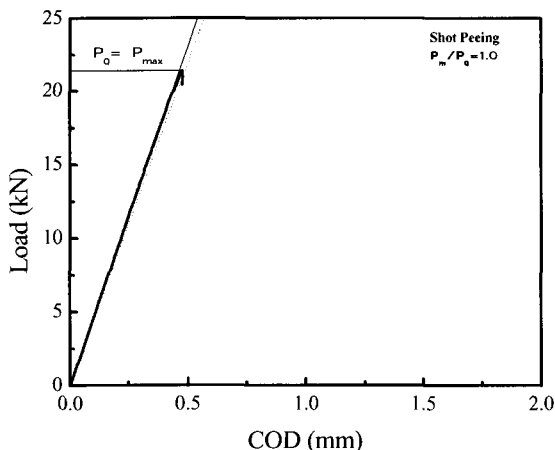


Fig. 8 Relations between load and COD in Shot peening

Table 5 Fracture toughness of peening and unpeening

	Critical load $P_Q(\text{kN})$	Maximal load $P_Q(\text{kN})$	$\sigma_y$ (MPa)	Elong. (%)	Fracture toughness $K_{IC}$ ( $\text{MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ )
peening	22.87	22.87	1079	9	78.2
unpeening	29.67	32.21	1079	9	101.5

### 3.4 파괴인성 시험 후의 파면

파괴인성시험 후 파괴 양상을 확인하기 위하여 전자현미경을 사용하여 파면을 확인하였다. Fig. 9는 파단된 파면에 형성된 shear lip의 형상을 나타낸 모식도를 나타내고 있다. 그림에서 (a)는 unpeening 소재의 파단면을 나타내는 것으로서 파단면의 양쪽 표면 부위에 shear lip이 크게 생성되어 있다는 것을 알 수 있으며 (b)는 peening 소재의 파단면을 나타내는 것으로서 (a)와는 달리 모서리에 약간의 shear lip이 형성되어 있는 것을 알 수 있다. 이는 Fig. 7과 Fig. 8에서 peening 소재가 unpeening 소재에 비해 파괴인성값이 약 30% 정도 감소하였다는 결과와 잘 일치한다. 즉, 예균열을 삽입한 시험편에 대하여 파괴인성 시험시 peening 소재는 소재가 고강도 강이므로 표면의 경화로 인하여 취성파단의 양상을 띠므로서 양단 표면부의 shear lip의 형성이 적었으나 unpeening 소재의 경우 파괴인성 시험 시 파괴에너지가 양단 표면에 소성역의 일종인 shear lip을 형성하는데 많은 에너지가 소비되었으므로 peening소재에 비해 상대적으로 파괴인성값이 크게 나왔다고 생각한다.

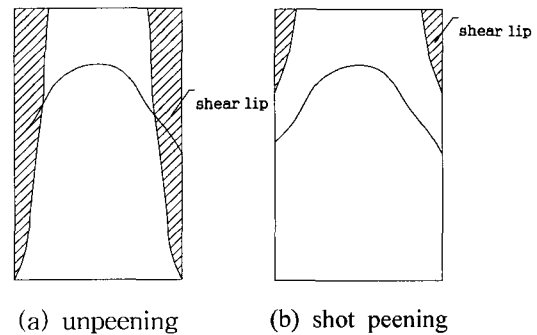
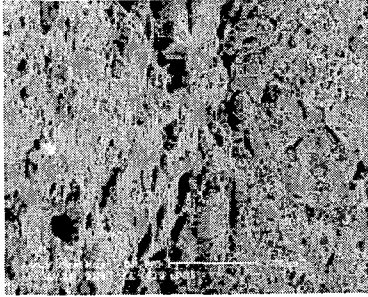


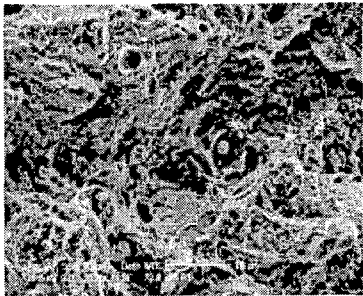
Fig. 9 Schematic diagram of fracture

Fig. 10과 Fig. 11은 파괴인성 시험 후의 파단면 사진을 나타내고 있다. Fig. 10의 (a)는 unpeening 소재의 shear lip이 형성된 경계를 나타내는 것으로서 shear lip 부분은 우측 중앙부에 비해 소성변형으로 인해 거친 파면을 형성하고 있다. (b)는 인

성시험 후의 중앙부 파면으로 계재물에 의해 형성된 공극과 국소적인 벽개파면을 확인 할 수 있다.

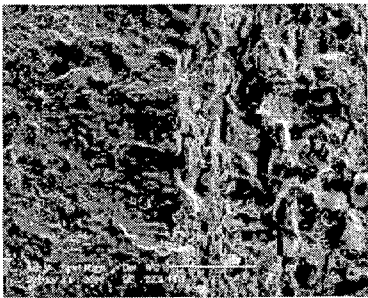


(a) shear lip boundary

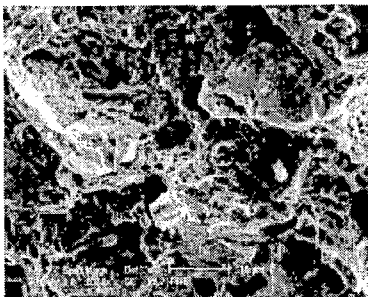


(b) middle point

Fig. 10 Fracture photo of unpeening



(a) shear lip boundary



(b) middle point

Fig. 11 Fracture photo of peening

Fig. 11은 peening 소재의 파면을 나타내는 것으로서 (a)인 shear lip 경계부분은 unpeening 소재에 비해 거칠게 찢겨져 파단된 것을 알 수 있으며 (b)의 중앙부 파면의 경우 unpeening 소재와는 달리 벽개파면이 대부분을 지배하고 큰 단을 형성하고 부분적으로 연성파면을 확인 할 수 있다. 이와같이 peening 과 unpeening 소재의 경우 파괴인성 시험 후 의 파면이 확연히 차이가 나며 이러한 파괴양식이 결국 파괴인성 값에 영향을 미친 것이라 생각한다.

#### 4. 결 론

쇼트피닝 가공에 의하여 형성된 금속표면부의 압축잔류응력이 고강도화에 기여하는 파괴역학적 기구를 정량적으로 분석하기 위해 스프링강(JIS G SUP-9)을 사용하여 표면에 쇼트피닝 가공을 실행하고 파괴인성특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 열처리 후 스프링강의 인장강도는 열처리전보다 약 87 % 증가하였으나, Peening 가공한 재료와 unpeening 재료의 기계적 물성치의 변화는 없었다.
2. 압축잔류응력이 형성된 쇼트피닝가공 시험편의 단면에 대한 경도분포는 표면에서  $H_v=465$ , 40  $\mu\text{m}$  깊이에서  $H_v=457$ , 80  $\mu\text{m}$  깊이에서  $H_v=455$ , 140~200  $\mu\text{m}$  깊이에서  $H_v=452$ , 200  $\mu\text{m}$  깊이 이후는  $H_v=456$ 으로 나타나고 있다.
3. 쇼트피닝가공을 한 시험편의 파괴인성치( $K_{IC}$ )는  $78.2 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ , 언피닝시험편의 파괴인성치는  $101.5 \text{ MPa} \cdot \text{m}^{0.5}$ 으로 쇼트피닝한 시험편에 비해 77 % 정도 높게 측정되었다.
4. peening 소재의 경우 파괴인성값이 unpeening 소재에 비해 저하하였으며, 이는 파괴인성 시험의 경우 대규모 항복상태이므로 표면의 압축잔류응력은 인성값의 향상에 기여하지 못했으며 peening에 의해 표면경화로 인한 취성파괴를 유도함으로써 파괴인성값이 저하한 것으로 생각한다.
5. unpeening의 경우 파괴인성 시험시 표면에 shear lip이 크게 형성됨으로서 파괴에너지가 이러한 소성변형의 일종인 shear lip을 형성하는데 소비됨으로서 파괴인성값이 증가한 것으로 생각한다.

### 참고 문헌

1. 박경동, 정찬기, 2001, “DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향”, 한국해양학회지, 제15권, 제3호, pp. 93~99.
2. 박경동, 김정호, 윤한기, 박원조, 2001, “압력용기용 SA516/70강의 고온파괴인성평가”, 한국해양학회지 제 15권, 제2호, pp. 99~104.
3. 박경동, 김정호, 윤한기, 박원조, 2001, “압력용기용 SA516/70강의 고온피로균열 진전거동에 대한 연구”, 한국해양학회지 제15권, 제2호, pp. 105~110.
4. 加藤容三, 高藤新三郎, 桐山眞紀, 1996, “Ti-6Al-4V合金の高温疲労強度に及ぼすショットピーニングの影響”, 日本材料學會論文集, Vol. 45, No. 1, pp. 43~47.
5. D. Kirt and M. Jarrett, 1990, “Influence of Shot Peening on Fatigue and Corrosion Fatigue Behavior of Structural Steel”, Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Tokyo, pp. 133~142.
6. C. M. Verpoort and C. Gerdes, 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.