

# SUP7 및 SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향

## The effect of compress residual stresses of shot peening for fatigue strength of SUP7 and SAE9254 steel

박경동 · 정찬기

K. D. PARK and C. G. JUNG

**Key Words** : Shot peening(쇼트 피이닝), Residual Stress(잔류응력), Control Cage(콘트롤 케이지), Hardness(경도), Rotary bending(회전굽힘), 1Stage Shot Peening(1단 쇼트 피이닝), 2Stage Shot Peening(2단 쇼트 피이닝), Fatigue(피로), Tempering(뜨임)

**Abstract** : Recently the steel parts used at automobiles are required to be used under high stress more than ever before in need of the weight down. To achieve this requirement of a high strength steel, it must be necessary to decrease inclusion content and surface defect as like decarburization, surface roughness etc.. In this study, the surface conditions are measured to know the influence on fatigue properties by two cases of two-stage shot peening and single-stage shot peening for two kinds of spring steel (SUP7, SAE9254). This study shows the outstanding improvement of fatigue properties at the case of two-stage shot peening in the rotary bending fatigue test and this is assumed to be from decreasing the surface roughness unchanging the surface hardness increasing the compressive residual stress. Results also show fatigue failures originated at inclusion near surface, and this inclusion type is turned out to be a alumina of high hardness.

### 1. 서 론

기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차등에 필요한 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화(고응력화)는 부품의 경량화를 실현시키므로써 재료절감과 고출력화라는 잇점을 갖고 있으나, 고응력화는 부품 설계형상이나 반복 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 금속파괴되는 현상이 발생된다<sup>1)</sup>.

이러한 피로파괴 원인중에서 금속내부에 존재하는 결함을 제외한 피로파괴 인자는 금속의 표면에 존재하는 결함이 대부분을 차지하고 있으므로 금속의 표면을 특수 가공 처리하여 피로 강도를 향상시키는 기술이 필요하고 이 분야에 대한 체계적인 연구가 요구되고 있다<sup>2)</sup>.

금속의 표면을 특수가공하여 피로강도를 향상시키기 위한 수단으로는 표면경화, 표면침탄, 표면질화, 쇼트피닝 가공에 의한 압축 잔류 응력부여 등과 같은 방법이 대표적이다. 여기에서 쇼트피닝 가공에 의한 금속표면부의 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로 균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정 성장을 지연시키기 위한 연구가 활발하게 이루어지고 있다<sup>3)</sup>.

Wohlfahrt<sup>4)</sup>는 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력의 영향 연구에서 압축잔류응력은 피가공물의 표면에서 최대값을 갖는 것이 아니라 피가공물의 표면 아래에서 최대값이 형성되고, 최대압축응력의 값은 쇼트피닝 가공 조건에 따라 향상 시킬수 있다고 하였다.

특히 Tange와 Takamura, Natto<sup>5)</sup>는 쇼트피닝가공에 의한 압축잔류응력과 피로균열진전과의 관계를 연구한 결과 피로균열진전 수명에 있어서 표면부에 형성된 압축잔류응력이 매우 중요한 인자이

접수일 : 2001년 5월 10일

박경동 : 부경대학교 기계공학부

정찬기 : 부경대학교 기계공학과 대학원

며 최대압축잔류응력이 표면에 가까이 형성 될 수록 피로수명이 증가함을 연구하였다.

본 연구에서는 1단쇼트피닝가공과 2단쇼트피닝가공을 하여 시험편 표면부에 형성된 최대압축잔류응력의 형성길이와 기계적성질의 변화, 경도변화 등을 조사하고 회전굽힘 시험에 의한 피로수명을 비교 고찰하여 쇼트피닝가공 효과를 스프링 최적 설계에 반영 하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드상태의 압연강재로서 스프링 강(SUP 7과 SAE 9254)이고, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
SUP7	0.59	0.19	0.84	0.012	0.003	0.03	-	-
SAE9254	0.55	1.36	0.7	0.01	0.002	-	0.68	-

시험편을 제조하기 위하여 와이어 로드 상태의 재료를 센터리스 바 터닝 머신에서 직선화 및 1차 표면 절삭 가공을 실행하였다.

1차 표면 절삭 가공된 재료는 Fig. 1과 같은 시험편 형상을 선반에서 연삭 여유 0.5mm를 주고 2차 가공한 후, 전기로에서 880℃로 30분간을 가열한 후 유중에서 담금질을 하였다.

그리고 담금질 완료된 시험편은 다시 연속식 가스 템퍼링노에서, 템퍼링 하였고, 가열온도 420℃, 균열시간 110분을 유지하여 템퍼링 하였다.

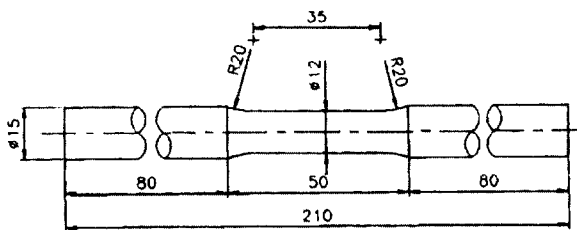


Fig. 1 Dimensions of specimen(mm)

그리고 템퍼링이 완료된 시험편의 표면경도와 진원도를 맞추기 위하여 원통 연삭기에서 Fig. 1과 같이 원통 연삭을 하였다.

또한 템퍼링 완료된 시험편의 기계적 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile Strength (N/mm <sup>2</sup> )	Hardness(H <sub>R</sub> )		Elongation (%)	Reduction of area (%)
		after Quenching	after Tempering		
SUP7	177.8	2.35	2.75	11.4	41.9
SAE9254	176.4	2.3	2.75	9.4	36.0

### 2.2 실험장치

스프링강에 있어서 2단 쇼트 피이닝이 피로강도에 미치는 영향을 고찰하기 위하여 1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝으로 나누어 실험 하였다.

그리고 1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝은 스프링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제조용 쇼트 피이닝기와 엔진밸브 스프링 제조용 쇼트 피이닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다.

또한 시험편이 원형단면임을 감안하여 표면 전체에 균일한 쇼트 피이닝 가공면을 얻기 위하여 1단 쇼트 피이닝의 경우는 Fig. 2와 같이 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 Fig.3과 같이 2개의 자전로울러 위에 올려 놓고 쇼트 볼 투사하였으며, 2단 쇼트 피이닝의 경우는 텀블링 바렐식 쇼트 피이닝기에서 쇼트 피이닝을 하기 위해 Fig. 4와 같이 시험편 양단을 고무 마개로 씌운 후 하였다.

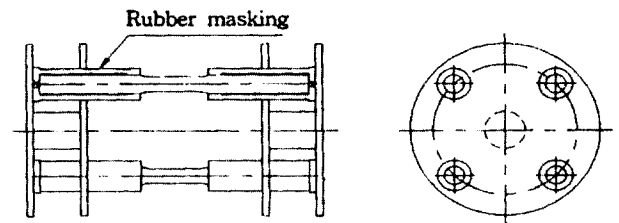


Fig. 2 Fixture of specimen

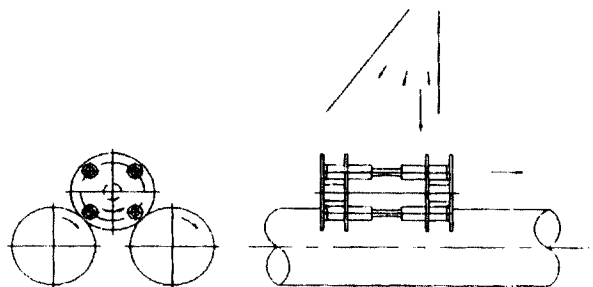


Fig. 3 Shot-peening apparatus

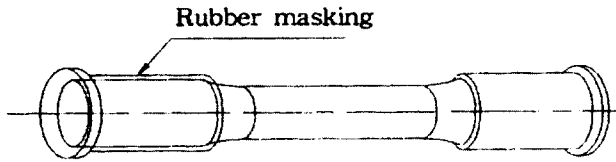


Fig. 4 Rubber masking for specimen

Table 3 Conditions of shot-peening

Condition	1 Stage Shot- Peening	2 Stage Shot-peening
Impeller Dia	490 mm	360 mm
Blades Width /Q'ty	90mm/6 pcs	60mm/6 pcs
r.p.m	2200 rpm	3000 rpm
Shot-Ball Dia.	0.8 mm	0.6 mm
Time	24 s	10 min.
Arc Height (Alman A-Stip)	0.375 mm	0.305 mm
Coverage	85 %	90 %

2.3 실험방법

2.3.1 잔류응력

쇼트 피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 $\mu$ m 단위로 연마 해가면서 Table 4 와 같은 X선 측정 조건 하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

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

2.3.2 회전 굽힘 피로시험

1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝된 시험편의 피로강도를 비교하기 위해 사용된 피로시험기는 오노식 회전 굽힘 피로시험기로서 회전수는 3,400 rpm 이며 실험 온도는 평균 실내온도 20 $^{\circ}$ C 상태에서 실행하였다. 그리고 본 시험기에 적용된 굽힘응

력은 다음과 같은 식(1)에 의하여 환산된 값을 적용하였다.

여기서  $L$ 은 거리 200mm,  $W$ ,  $d$ ,  $M$ 은 각각 추의 질량(kg), 시험편직경(mm), 굽힘모멘트(Nmm)이고  $\sigma$ 는 응력을 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 M &= WL/2 \\
 &= 100 W \quad (\text{Nmm}) \\
 \sigma &= M/Z \\
 &= 32 M/\pi d^3 \\
 &= 3200 W/\pi d^3 \\
 &= 1018.6 W/d^3 \quad (\text{N/mm}^2) \quad (1)
 \end{aligned}$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축 잔류응력의 영향

연삭된 시험편의 표면에 1단 및 2단으로 쇼트 피이닝하여 표면에 형성된 압축잔류응력의 영향을 측정하였다. Fig. 5는 Sup7 강의 시험편 표면에 1단 및 2단 쇼트피이닝을 한 후 표면의 압축잔류응력을 측정하여 압축잔류응력의 1단 쇼트피이닝과 2단 쇼트피이닝 결과를 비교하여 표시하였다. 1단 쇼트피이닝에서는 압축잔류응력이 최대 68N/mm $^2$ , 깊이가 50 $\mu$ m로 되었으나, 2단 쇼트피이닝에 의해서는 최대 압축잔류응력이 73N/mm $^2$ , 깊이가 80 $\mu$ m로 나타났다. 1단 쇼트피이닝보다 2단 쇼트피이닝에 의하여 5N/mm $^2$ 의 압축응력과 30 $\mu$ m의 깊이가 더 깊게 나타났다.

Fig. 6에는 SAE 9254 강의 시험편 표면에 1단 및 2단으로 쇼트피이닝 한 후 압축잔류응력을 측정하여 그 결과를 1단과 2단을 비교하여 표시하였다. 1단 쇼트피이닝에서는 최대 압축잔류응력이

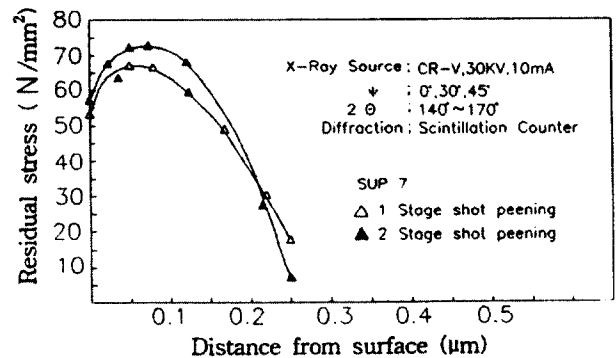


Fig. 5 Residual stress distributions produced by shot-peening (SUP 7)

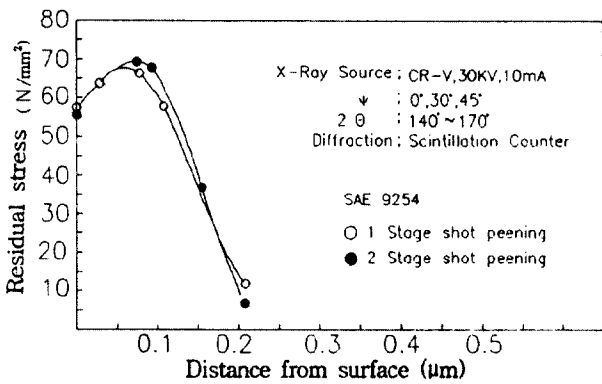


Fig. 6 Residual stress distributions produced by shot-peening(SAE 9254)

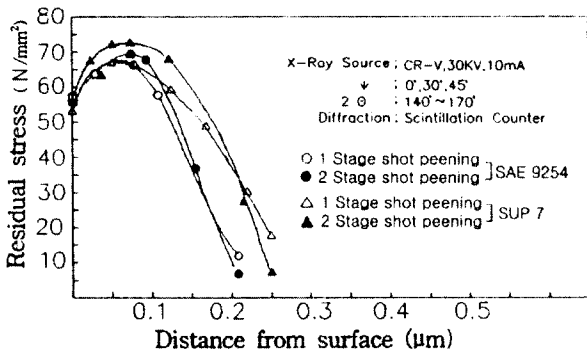


Fig. 7 Residual stress distributions produced by Shot-peening(SAE 9254, SUP 7)

67N/mm<sup>2</sup>로 50µm 깊이에서 이루어졌으나 2단 쇼트피이닝에 의해서는 최대 압축잔류응력이 70N/mm<sup>2</sup>, 80 µm 깊이로 나타났다. 2단 쇼트피이닝에 의하여 3N/mm<sup>2</sup>의 압축잔류응력이 증가하였고 깊이도 30µm 더 깊어졌다.

위의 두 재료를 보면 2단 쇼트피이닝이 1단 쇼트피이닝에 비하여 압축잔류응력 값이 높게 형성되어 최대값이 3~5N/mm<sup>2</sup> 정도 상승되었고 형성된 압축잔류응력 최대값의 깊이도 두 재료가 동일하게 30µm 깊어져 전체적인 압축잔류응력의 형성층이 넓게 증가되어 있음을 Fig. 7에 Sup7과 SAE 9254 재료의 결과를 비교하여 나타내었다.

### 3.2 쇼트피이닝이 경도에 미치는 영향

Fig. 8 및 Fig. 9에 Sup7과 SAE 9254 강에 대하여 1단 쇼트피이닝 후의 경도분포 측정결과와 2단 쇼트피이닝 후의 경도 측정결과를 각각 비교하여 표시하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기로 측정하였다. Sup7강의 경도 분포는 1단 쇼트피이닝에 의해 Hv 503~575로 측정결과가 나타났으나

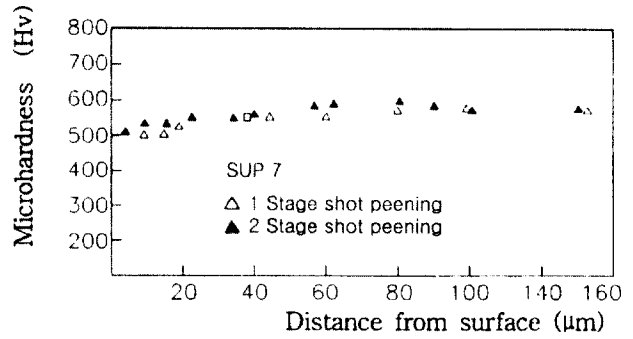


Fig. 8 Hardness distributions produced by shot-peening(SUP 7)

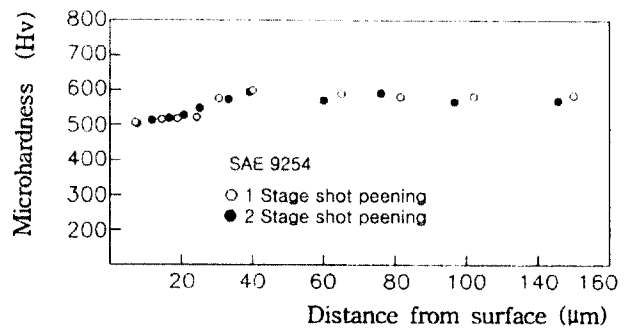


Fig. 9 Hardness distributions produced by shot-peening(SAE 9254)

2단 쇼트피이닝에 의해서는 Hv 514~595로 2단 쇼트피이닝에 의하여 약간 증가하였으나 그 차이가 미세하다.

그리고 Fig. 9에는 SAE 9254강의 1단 및 2단 쇼트피이닝 한 후 경도 분포를 측정, 비교하여 나타내었다. 경도 측정 결과를 보면 1단 쇼트피이닝 후 최소 경도값 Hv=503, 최대 경도값 Hv=595이고 2단 쇼트피이닝 한 후 경도를 측정한 결과는 최소 경도값 Hv=503, 최대 경도값 Hv=600으로 SAE 9254의 경우는 경도가 거의 동일한 값으로 나타났다. 이것은 2단 피이닝을 하여도 경도 증가는 미미하다는 것을 보여 준 것이다.

### 3.3 피로 수명에 미치는 쇼트피이닝에 의한 압축 잔류응력의 영향

Fig. 10은 Sup7강에 대하여 1단 및 2단 쇼트피이닝 처리 한 후 압축잔류응력이 피로수명 및 피로강도에 미치는 영향을 회전 굽힘피로 S-N선도로 표시하였다.

시험편의 1단 쇼트피이닝과 2단 쇼트피이닝의 효과를 보면 Sup7강의 경우 시험적용 최소 응력 76N/mm<sup>2</sup>에서 41만회에 파단되었다. 그러나 2단

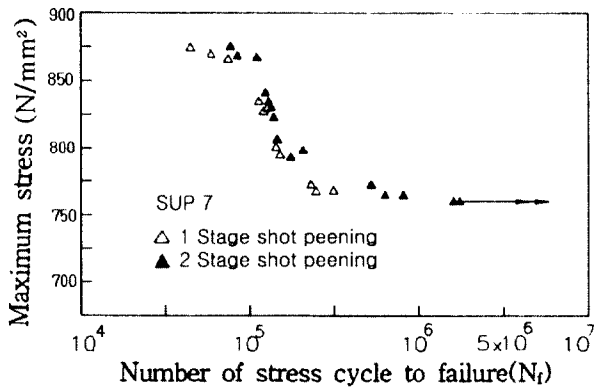


Fig. 10 Rotary bending fatigue S-N curves for SUP 7

쇼트피닝 처리한 후 최소 응력  $76\text{N/mm}^2$ 에서는 230만회 진행되어도 파단되지 않았다. 또 작용 응력 최대  $87\text{N/mm}^2 \sim 80\text{N/mm}^2$ 사이에서도 1단의 경우 10만회 정도에서 파괴되었으나 2단의 경우 50만회 이상 진행되어도 파단 되지 않았다. 이 결과를 보면 2단 처리에 의한 피로 수명이 5배 이상 증가함을 알게 되었다.

Fig. 11은 SAE 9254 강에 대하여 1단 및 2단 쇼트피닝 처리 후 압축잔류응력이 피로 수명과 피로강도에 미치는 결과를 S-N 곡선으로 나타내었다.

1단 쇼트피닝 처리 후 회전 굽힘 피로시험을 한 결과 작용 응력인  $76\text{N/mm}^2$ 에서는 46만회에서 파괴 되었으나 2단 쇼트피닝 처리 후에 작용 응력  $76\text{N/mm}^2$ 에서는 250만회 진행되어도 파손되지 않았다. 이 결과에서 2단 쇼트피닝에 의해 역시 약 5배의 피로 수명과 강도가 증가됨을 알 수 있다.

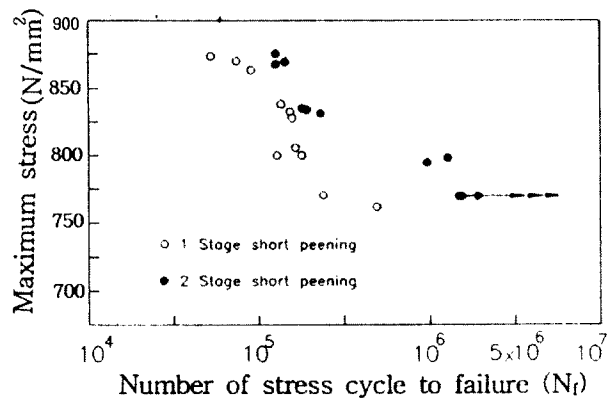


Fig. 11 Rotary bending fatigue S-N curves for SAE 9254

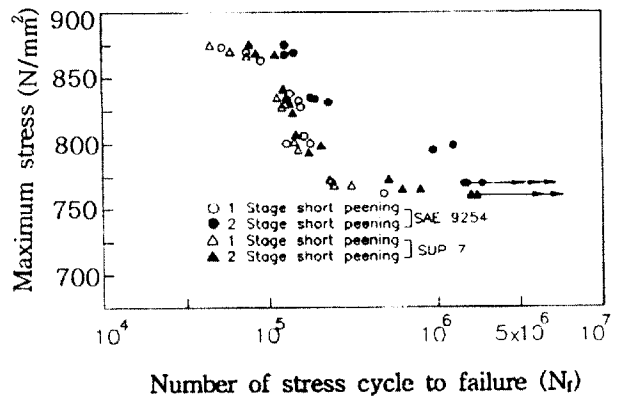


Fig. 12 Rotary bending fatigue S-N curves for SUP 7, SAE 9254

Fig. 12에는 Sup7강과 SAE 9254강의 피로 시험 결과를 S-N곡선으로 비교하여 나타내었다. 작용응력  $76\text{N/mm}^2$ 의 경우 1단 쇼트피닝에서 Sup7강이 41만회 SAE 9254강이 46만회로 Sup강에 비해 SAE 9254강이 5만회정도 피로 수명이 증가하였다. 2단 쇼트피닝 후 Sup7강과 SAE 9254강의 피로 수명을 비교하면 작용응력  $76\text{N/mm}^2$ 에서 Sup7강이 230만회 작용 시켜도 파손되지 않고 피로 수명의 증가 상태를 보였다. 이 결과를 보면 2단 쇼트피닝의 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

이렇게 1단에 비해 2단의 경우가 피로 수명이 크게 증가하는 것은 표면의 압축잔류응력 증가와 표면조도 개선에 따른 피로 균열 전파 억지력의 향상에 기인한 것으로 판단된다.

### 3.4 피로파단면 고찰

Fig. 13, 15은 1단 쇼트 피닝된 시험편의 강종별 피로 파손면을 SEM으로 관찰한 사진이고 Fig. 14, 16, 17은 2단 쇼트 피닝된 시험편의 강종별 피로파단면에 대한 SEM 사진이다. 그리고 사진의 배율은 30배, 200배, 400배 순으로 배열하였다<sup>6)</sup>. 여기서 관찰된 사진을 고찰해 볼 때 1 단 및 2 단 쇼트 피닝 조건 모두 피로 기점이 표면에서 시작하여 내부로 진행되는 정상적인 피로파단면을 나타내고 있다.

그리고 Fig. 17은 2단 쇼트 피닝된 시험편인 SAE 9254 강종으로서 피로응력이  $80\text{N/mm}^2$  상태에서 피로회수 24만회 진행중 초기절손된 단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 이 조건의 정상적인 피로회수는 Fig. 11의 S-N 선도상에서 120만회 부근이다.

위와 같은 조기파단은 표면으로부터 0.5mm 깊



Fig. 13 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SAE 9254 under 1 stage shot-peened

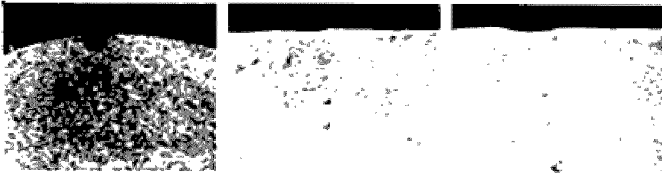


Fig. 14 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SAE 9254 under 2 stage shot-peened

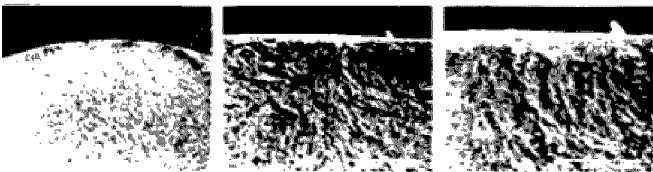


Fig. 15 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP 7 under 1 stage shot-peened

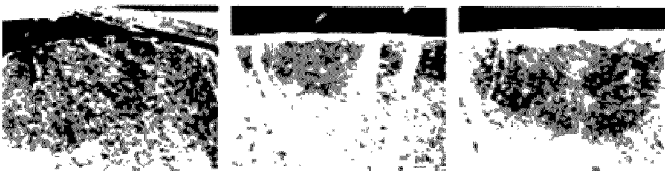


Fig. 16 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP 7 under 2 stage shot-peened



Specimen : SAE 9254  
 Condition : 2 stage Shot-Peening  
 Fatigue Limit : 80N/mm<sup>2</sup>  
 Number of Cycles : 240,000 rpm

Fig. 17 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region

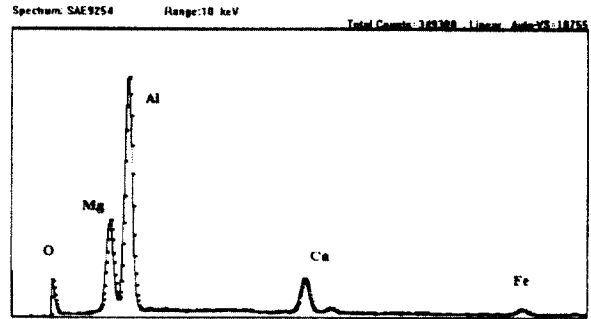


Fig. 18 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (SAE 9254)

이에 크기가 42 $\mu$ m 인 비금속 개재물을 기점으로 하여 파단 되었음이 관찰되었다.

위에서 거론된 조기파단면상에서 관찰된 비금속 개재물은 EDS(Energy dispersive Spectrometer, KEVEX INSTRUMENT, SIGMA-3)로 분석한 결과 산화알루미늄( $Al_2O_3$ )으로 판명되었으며 그 결과는 Fig. 18에서 알수 있다<sup>7)</sup>.

이와 같이 고응력을 받는 재료는 표면에서 파단 될 수 있는 조건(탈탄, 균열, 경화)이 많아 대개의 피로파괴 기점이 표면에서 이루어진다. 따라서 1단 쇼트 피이닝 조건의 경우는 금속 내부에 존재하는 비금속 개재물을 기점으로 하여 파단되는 현상이 없었으나, 2단 쇼트 피이닝된 시험편이 비금속 개재물에 의해 피로파괴되는 현상은 표면의 압축잔류응력 증가 및 표면조도 개선에 따른 피로 균열 전파 역지력 향상에 기인한다고 보며, 비금속 개재물의 피로에 대한 영향 평가는 여러 학자에 의하여 보고되어 있다<sup>8)</sup>.

#### 4. 결론

1. 1단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력보다 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 3~5N/mm<sup>2</sup> 증가하였으며 깊이도 30 $\mu$ m 더 깊게 나타나 2단 쇼트피이닝의 효과가 크게 나타났다. SUP 7강 재가 SAE 9254강보다 3N/mm<sup>2</sup>의 압축잔류응력의 효과가 크게 나타났다.
2. 1단 및 2단 쇼트피이닝에 의한 경도분포는 SUP 7강의 1단 쇼트피이닝보다 2단 쇼트피이닝의 경우가 약간은 증가 하였다. 또 SAE 9254의 경우도 경도 증가가 미미 하였다. 이것은 2단 쇼트 피이닝의 효과가 경도 증가에는 영향을 미치지 못함을 알수있다.
3. 1단 및 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 피로수명에 미치는 영향으로 작용응력 76N/mm<sup>2</sup>

일 때 SUP 7강은 1단 쇼트피이닝에서 41만회에  
서 파괴되었다. 2단 쇼트피이닝은 250만회 진행  
되어도 파손되지 않고 SAE 9254강의 파손되지  
않아 2단쇼트피이닝에 의해 5.4~6배의 피로수명  
이 증가하였다. 이 결과 스프링강의 제작에 새로  
운 기술과 방법을 제안하였다.

#### 참고문헌

1. G. E. Griffith, "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids", Trans. R. Soc., Vol. A221, pp. 163~164, 1920
2. 日本金屬學會, 金屬便覽, 丸善, pp. 471~901, 1970
3. 村上, 大南, 疲勞力學 入門, オ-ム社, pp. 121~127, 1979
4. A. Wohler. "Experiments on the Strength of Metals Engineering", pp. 160~165, 1967
5. 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
6. SAE Manual, SAE Manual on Shot-Peening, SAE J 808a, pp. 104~110, 1970
7. W. E. Dudsworth, Metallurgia, Vol. 69, No. 412, pp. 53~57, 1964
8. N. Cummings, WADC Tech. Rep., PB161144, pp. 59~61, 1959