

스프링강의 피로강도에 미치는 압축잔유응력의 영향

박경동 · 정찬기*

부경대학교 기계공학부

*부경대학교 대학원 기계공학과

The effect of compress residual stresses for fatigue strength of Spring Steel

KEYOUNG-DONG PARK, CHAN-GI JUNG*

School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

* School of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Shot peening 쇼트 피이닝, Residual Stress 잔류응력, Control Cage 콘트롤 게이지, Hardness 경도, Rotary bending 회전굽힘, 1Stage Shot Peening 1단 쇼트 피이닝, 2Stage Shot Peening 2단 쇼트 피이닝, Fatigue 피로, Tempering 뜨임, Centerless Bar Trurning M/C 센터레스바터닝 머신, Wire Rod 와이어로드

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 shot peening of two-stage shot peening and single-stage shot peening. And for this study, two kinds of spring steel (SAE 9254, DIN 50CrV4) are made. 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

- (1) on low stress condition, the single stage shot peening is not affected by nonmetallic inclusion under metal.
- (2) it is possible that the two-stage shot peening increases the fatigue life and the high stress, but, that is affected by nonmetallic inclusion under metal.
- (3) so far, be easly 50CrV4 have made high stress.

But, 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

최근 기계, 항공기, 자동차 등에서 요구되는 고응력화는 부품의 경량화를 요구한다. 따라서 사용되는 재료, 특히 철강재는 고응력화 되어야 한다는 것이 필수적인 사항이 되고 있다.

그러나 부품에 반복되는 하중 즉 피로하중이 작용함에 따라 어느 순간 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다.(村, 1979)

이와 같이 피로파괴와 관련된 각종 인자의 연구와 파괴거동에 대한 연구가 활발히 행해지고 있으며 근래에는 피로강도를 향상시킬수 있는 각종 인자에 대한 연구도 활발히 진행되어 가고 있다. 그러나 피로강도 향상 인자중 금속의 표면처리에 의한 피로강도 향상은 처리 조건이나 방법에 따라 결과가 복

잡하게 나타나는 현 실정으로서 이 분야에 대한 체계적인 연구가 요망된다.(日本金屬學會, 1970)

특히 각종 기계, 항공기, 자동차등의 경량화를 실현키 위해 사용되는 철강재의 고응력화가 요구되는 현 시점에서는 철강재 내부에 피로파괴의 원인이 되는 비금속 개재물이 존재치 않아야 하고 한편 철강재 표면에는 탈탄이 없어야하는 것이 필수적인 사항으로 지적되고 있다.(ばね 技術研究會, 1987)

이와 같이 피로강도 저하의 인자중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재의 표면부위의 결함이 되기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 어떠한 조건 유지 방법으로 쓰이고 있으며 쇼트 피이닝은 수많은 양의 쇼트 볼(Shot Ball)을 일정한 속도로 금속 표면에 투사하는 것으로서, 쇼트 볼에

의해 타격된 금속 표면은 요철면을 이루게 되고, 요철의 깊이는 대개 0.13~0.16mm 정도이며, 또한 표면은 소성 가공에 의한 가공경화층과 압축 잔유응력층을 표면부 가까이 형성하게 된다.

여기에서 가공경화에 따른 경도의 증가는 피로수명에 큰 영향을 주지 않으며, 표면의 요철과 압축 잔유응력이 피로수명에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다.(SAE Manual, 808)

특히 금속 표면에 압축 잔유응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 역지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 여기서 압축 잔유응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성 될 수 있도록 하고, 또 압축 잔유응력이 높게 형성 될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.

지금까지 1단 쇼트피이닝에 의한 압축잔유응력의 연구는 있었으나 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔유응력이 피로강도에 미치는 영향에 대한 연구는 없다.

본 연구는 쇼트 피이닝 효과를 극대화 시키기 위하여 스프링강에 쇼트 피이닝을 1단, 2단으로 적용시켜 쇼트 피이닝에 의한 기계적 성질의 변화, 경도변화, 조도향상에 의한 표면의 평활화등을 고응력 조건에서 피로수명으로 비교 고찰하여 쇼트 피이닝 효과를 스프링 최적 설계에 이용코저한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드(Wire Rod) 상태의 압연강재로서 스프링 강(SAE 9254, DIN 50CrV4)이고, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of Specimen(wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
50CrV4	0.50	0.27	0.82	0.02	0.005	-	0.10	0.117
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. 2-1과 같은 시험편 형상을 선반에서 연삭 여유 0.5mm를 주고 2차 가공한 후, 전기로에서 880℃로 30분간을 가열한 후 유증에서 담금질을 하였다.

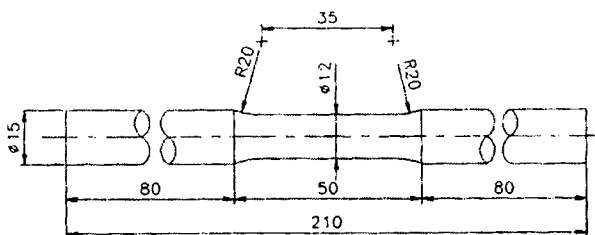


Fig. 1 Dimensions of specimen

그리고 담금질 완료된 시험편은 다시 연속식 가스 템퍼링에서, 50CrV4 강재의 경우는 가열온도 370℃, 가열시간 80분을 유지하여 템퍼링 하였고, SAE 9254 강재의 경우는 가열온도 420℃, 균열시간 110분을 유지하여 템퍼링 하였다.

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

또한 템퍼링 완료된 시험편의 기초적인 기계적 성질을 체크하였으며, 그 특성은 Table 2 와 같다.

여기서 표시한 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 브리넬 경도값 (Ball Dia. : 10mm, 하중: 3000Kg)이다.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile Strength (Kg/mm ²)	Hardness(HrC)		Elongation (%)	Reduction of area (%)
		after Quenching	after Tempering		
50CrV4	179.5	2.5	2.75	9.4	35.7
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 같이시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 Fig.3과 같이 2개의 자전 로울러 위에 올려 놓고 쇼트 볼 투사하였으며, 2단 쇼트 피이닝의 경우는 텀블링 바렐식 (Tumbling barrel Type) 쇼트 피이닝기에서 쇼트 피이닝을 하기 위해 Fig 4 와 같이 시험편 양단(자루부분)을 고무 마개로 씌운 후 하였다.

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 r.p.m	3000 r.p.m
Shot-Ball Dia.	0.8 mm	0.6 mm
Time	24 sec.	10 Min.
Arc Height (Alman A-Stip)	0.375 mm	0.305 mm
Coverage	85 %	90 %

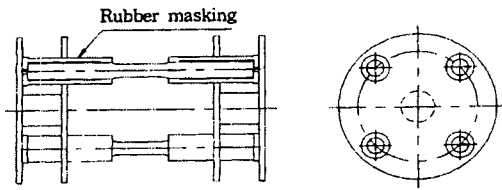


Fig. 2 Fixture of specimen

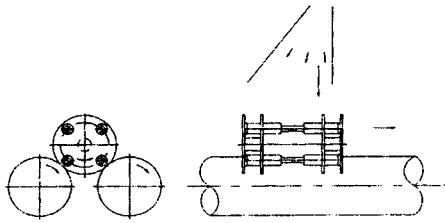


Fig. 3 Shot-peening apparatus

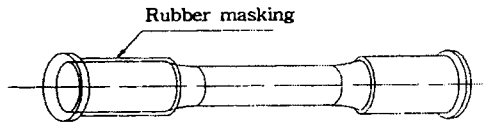


Fig. 4 Rubber masking for specimen

2.3 시험방법

2.3.1 잔류응력

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

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction		Condition	
X-Ray Source	Target	Cr-V	
	Voltage	30 KV	
	Current	10 mA	
ψ	0°, 15°, 30°, 45°		
2 θ	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 r.p.m 이며 시험 온도는 평균 실내온도 20 $^{\circ}$ C 상태에서 실행하였다.

그리고 본 시험기에 적용된 굽힘응력은 다음과 같은 식에 의하여 환산된 값을 적용하였다.

- 하중 지점간의 거리 L(mm)

(본 시험에서는 200mm를 적용함)

- 추의 중량 W(kg)
- 시험편의 직경 d(mm)
- 균일 굽힘모멘트 M(kg·mm)
- 시험편에 발생되는 응력 σ kg/mm²

$$M = WL/2 = 100 W \quad (\text{kg}\cdot\text{mm})$$

$$\sigma = M/Z = 32M / \pi d^3 = 3200 W / \pi d^3 = 1018.6 W / d^3 \quad (\text{kg/mm}^2)$$

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 영향

연삭된 시험편의 표면에 쇼트 피이닝하여 표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였다.

Fig. 5는 압축 잔류응력 분포로 SAE 9254 강종의 시험편에 1단 및 2단 쇼트 피이닝을 한 후 표면의 압축 잔류응력을 측정 한 결과값으로서 압축 잔류응력이 1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝의 결과가 같은 값으로 나타나고있으며, 1단 쇼트 피이닝의 최대값(-67kgf/mm²)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다.

그리고, 2단 쇼트 피이닝의 최대값(-70kgf/mm²)은 80 μ m 깊이에서 이루어졌다.

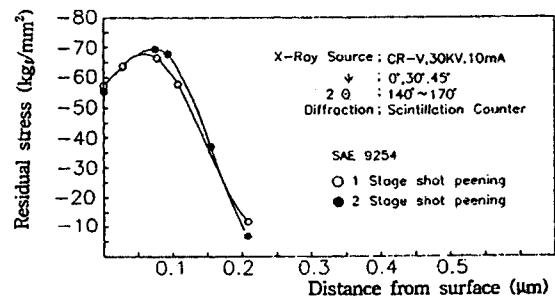


Fig. 5 Residual stress distributions produced by Shot-peening (SAE 9254)

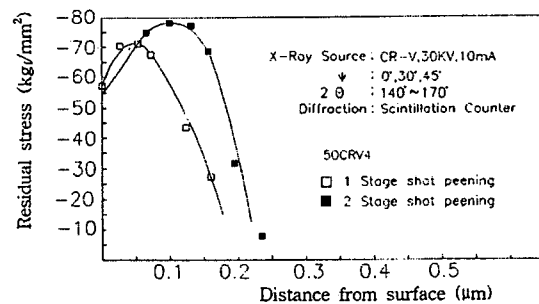


Fig. 6 Residual stress distributions produced by Shot-peening (50CrV4)

Fig. 6은 50CrV4 강종의 표면에 대한 압축 잔류응력의 분포를 보여주는 결과값으로서, 표면부 압축 잔류응력이 1단 쇼트 피이닝에 비하여 2단 쇼트 피이닝의 결과값이 오히려 낮게 분포되었으며, 1단 쇼트 피이닝에 대한 최대 압축 잔류응력(-72kgf/mm²)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다. 그리고 2단 쇼트 피이닝의 최대 압축 잔류응력(-78kgf/mm²)값이 100 μ m 깊이에서 이루어지므로서 압축 잔류응력층이 한층 더 두터워졌다.

위와 같이 관찰된 결과값을 종합해 보면, 1단 쇼트 피이닝에 비하여 2단 쇼트 피이닝된 모든 시험편에서 압축 잔류응력의 최대값이 3~6Kgf/mm² 정도 상승되었고, 형성된 압축 잔류응력 최대값의 깊이도 25~50 μ m 깊어져 전체적인 압축 잔류응력 形成層이 넓게 증가 되어 있음을 Fig. 7에서 나타냈다.

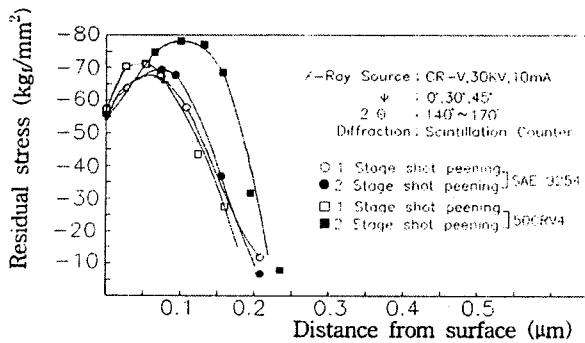


Fig. 7 Residual stress distributions produced by Shot-peening (SAE 9254, 50CrV4)

3.2 쇼트피이닝과 경도분포 관계

Fig 8 및 Fig 9에 DIN50CrV4와 SAE9254강에 대하여 1단 쇼트피이닝후의 경도분포와 2단 쇼트피이닝 이후의 경도분포를 나타내었다. DIN50CrV4강의 경우 1단 쇼트피이닝후 최소경도값 Hv=503 최대경도값 Hv=586으로 나타났다.

2단 쇼트피이닝 후의 최소경도값 Hv=525 최대경도값 Hv=637로 나타나 1단에 비해 2단의 경우가 최소, 최대 각각 22~51 증가하였다.

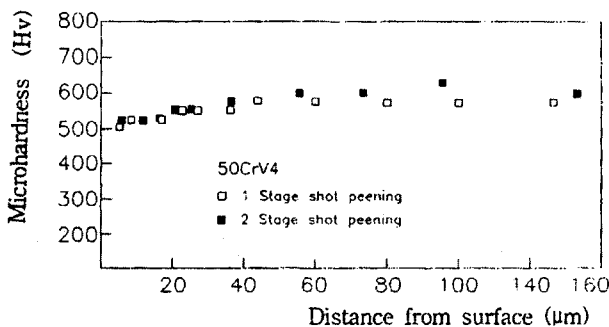


Fig. 8 Hardness distributions produced by Shot-peening (50CrV4)

SAE9254의 경우 1단 쇼트피이닝후 최소경도값 Hv=503 최대경도값 Hv=600 2단 최소경도값 Hv=503 최대경도값 Hv=595로

증가없이 거의 동일한 값을 나타내었다. SAE9254경우는 자체 경도가 높은 재료이므로 2단의 영향이 적은 것으로 생각된다.

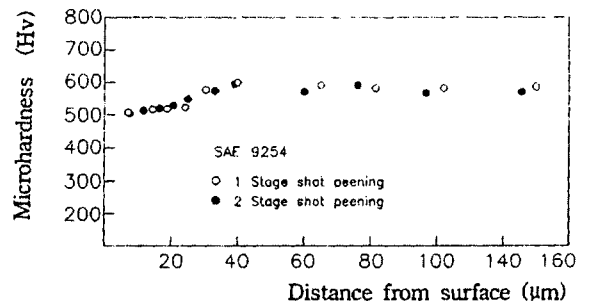


Fig. 9 Hardness distributions produced by Shot-peening (SAE 9254)

3.3 피로수명에 미치는 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력의 영향

1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리된 시험편에 대한 피로수명을 조사하였다. 이때 피로강도는 최소 ± 76 kgf/mm², 최대 ± 87 kgf/mm²를 적용하였으며, Fig 10, Fig 11, Fig 12는 SAE 9254, 50CrV4 강종에 대한 회전 굽힘 S-N 선도다. 그리고 실험은 피로 반복회수를 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ 회의 범위에서 실행하였다. 시험편의 1단 쇼트 피이닝 과 2단 쇼트 피이닝의 효과를 관찰해 보면, 1단 쇼트 피이닝된 시험편은 본 피로시험의 최소 응력인 ± 76 kgf/mm² ($\Delta\sigma/2 : 152$ kgf/mm²) 부근에서 SAE 9254는 46만회, 50CrV4는 46만회로 관찰되었다.

그리고 2단 쇼트 피이닝된 시험편은 본 시험의 최소 응력인 ± 76 kgf/mm² ($\Delta\sigma/2 : 152$ kgf/mm²) 에서 SAE 9254가 250만회, 50CrV4는 320만회 진행에도 파손되지 않았다.

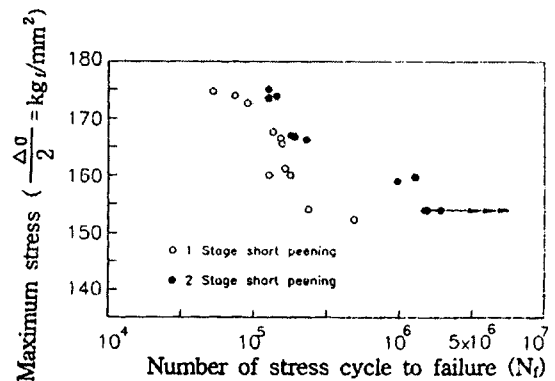


Fig. 10 Rotary bending fatigue S-N curves for SAE 9254 specimen

그리고 본 피로시험의 최고 응력이 ± 87 kgf/mm² ($\Delta\sigma/2 = 174$ kgf/mm²)에서의 1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리된 조건의 모든 시험편에서의 피로수명이 다소 편차는 있으나 10만회 부근에서 파손되었으며, SAE 9254와 50CrV4는 본 피로시험의 최소 응력까지 점진적인 피로수명 증가 상태를 보여 주고 있다.

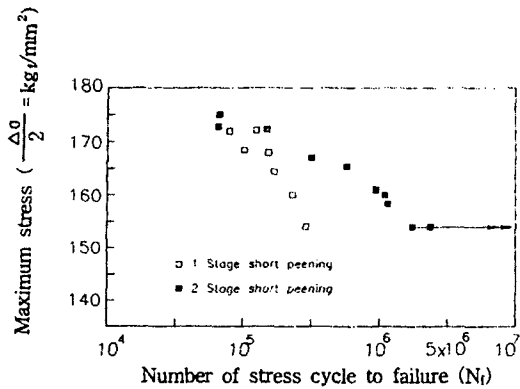


Fig. 11 Rotary bending fatigue S-N curves for 50CrV4 specimen

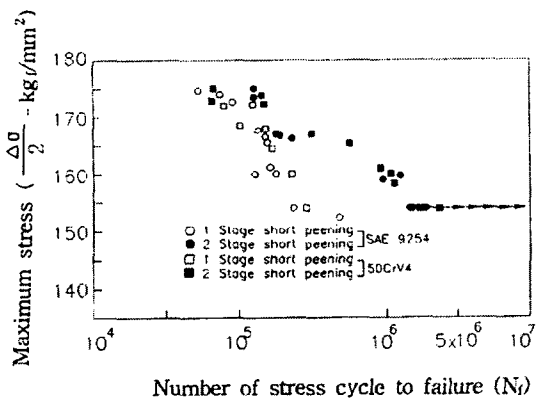


Fig. 12 Rotary bending fatigue S-N curves for SAE 9254, 50CrV4 specimen

3.4 피로 파단면의 고찰

피로시험 진행중 파단을 1단 쇼트 피이닝 조건과 2단 쇼트 피이닝 조건에서 강종별로 Fig. 10의 S-N 선도상 정상 피로회수를 나타내는 시험편을 샘플링하여 SEM (주사형 전자현미경, Scanning Electron Microscope, HITACHI 社 S-2150) 으로 관찰하였다.

Fig 15, 17, 19은 1단 쇼트 피이닝된 시험편의 강종별 피로 파손면을 SEM으로 관찰한 사진이고, Fig 16, 18, 20은 2단 쇼트 피이닝된 시험편의 강종별 피로파단면에 대한 SEM 사진이다. 그리고 사진의 배율은 30배, 200배, 400배 순으로 배열하였다.

여기서 관찰된 사진을 고찰해 볼 때 1 단 및 2단 쇼트 피이닝 조건 모두 피로 기점이 표면에서 시작하여 내부로 진행되는 정상적인 피로파단면을 나타내고 있다.

위와 같은 조기파단은 표면으로부터 0.5mm 깊이에 크기가 42 μ m 인 비금속 개재물을 기점으로 하여 파단 되었음이 관찰되었다.

Fig. 20 역시 조기 파단으로서 2단 쇼트 피이닝된 50CrV4 강종의 시험편이고, 응력은 $\pm 83\text{kgf/mm}^2$ ($\Delta\sigma/2 = 166\text{kgf/mm}^2$)일 때 피로회수 77600회 진행중 파단된 단면은 표면으로부터 0.8mm 깊이에 22 μ m 크기로 존재하는 비금속 개재물을 기점으로 하여

피로파괴가 진행되었음이 확인되었다.

이 시험편은 앞서 제시한 S-N 선도 (Fig. 3-6)에 의하면 56만~76만회 파단되는 것이 정상 피로파괴로 보이지만 조직 내부의 비금속 개재물에 의해 77600회에서 조기절손된 것이다.

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. 13, 14에 나타내었다.

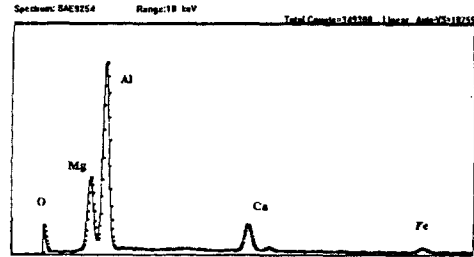


Fig. 13 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (SAE 9254)

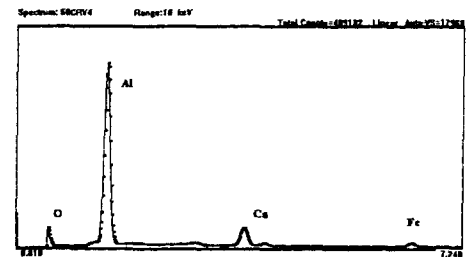


Fig. 14 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (50CrV4)

이와 같이 고응력을 받는 재료는 표면에서 파단될 수 있는 구조(탈탄,균열,경화)가 많아 대개의 피로파괴 기점이 표면에서 이루어 진다. 따라서 1단 쇼트 피이닝 조건의 경우는 금속내부에 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 균열전파 억제력 향상에 기인한다고 보며, 비금속 개재물의 피로에 대한 영향 평가는 여러 학자에 의하여 보고 되어 있다(W.E.Dudsworth, 1964;H.N.Cummings,1959).

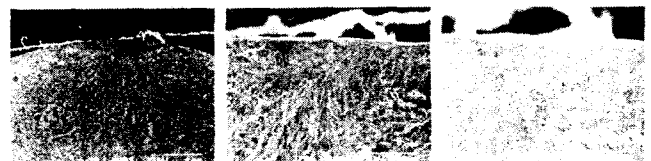


Fig. 15 SEM photographs of fracture surface aroundcrack initiation point for specimen SAE 9254 under 1 stage shot-peened

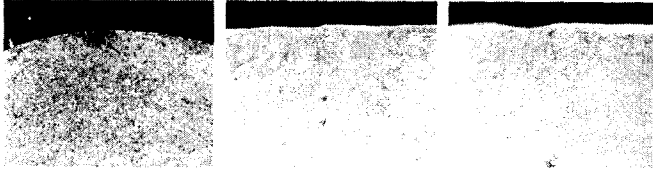


Fig. 16 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SAE 9254 under 2 stage shot-peened

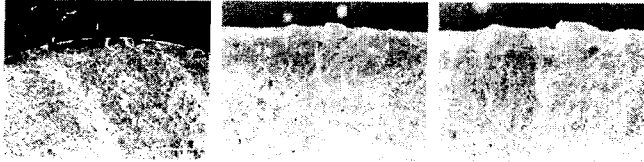
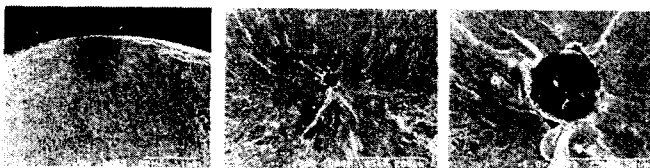


Fig. 17 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 1 stage shot-peened



Fig. 18 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 2 stage shot-peened



Specimen : SAE 9254
 Condition : 2단 Shot-Peening
 Fatigue Limit : $\Delta \sigma/2$: 160kgf/mm² (± 80 kgf/mm²)
 Number of Cycles : 240,000 r.p.m.

Fig. 19 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta \sigma/2 = 160$ kgf/mm²



Specimen : DIN 50CrV4
 Condition : 2단 Shot-Peening
 Fatigue Limit : $\Delta \sigma/2$: 166kgf/mm² (± 83 kgf/mm²)
 Number of Cycles : 77,600 r.p.m.

Fig. 20 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta \sigma/2 = 166$ kgf/mm²

4. 결 론

SAE 9254 및 DIN50CrV4를 열처리에 의한 소재의 균일조건(경도 및 열처리조직)을 만족시킨 후 이 시험편을 다시 강종별로 1단 쇼트 피이닝된 시험편과 2단 쇼트 피이닝된 시험편을 구분하여 기계적성질과 표면조도의 변화, 표면부위의 경도분포 및 잔류응력 분포를 측정하고 회전굽힘 피로시험에 의해 피로수명 측정과 파단면을 관찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 1단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력보다 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 3~6kgf/mm² 향상되었으며 압축잔류응력의 깊이도 25~50μm깊어져 압축잔류응력 형성층이 넓게 증가하였다.
2. 반복 굽힘 응력 ± 76 kg/mm²에서 1단 쇼트피이닝에 의한 피로반복회수는 SAE9254가 46만회 50CrV4가 46만회 였으나 2단 쇼트피이닝에 의한 피로반복회수는 SAE9254가 250만회, 50CrV4가 320만회로 1단 쇼트피이닝보다 2단 쇼트피이닝에 의한 피로반복회수가 5.4배~7배 향상되었다. 이 결과로 스포링강의 제작에 2단 쇼트피이닝의 효과가 크게 나타나 2단 쇼트피이닝에 의한 제작 기술을 개발하였다.
3. 2단 쇼트피이닝에 의해 표면의 잔류응력층이 넓게 형성되고 표면조도 상태를 향상시켰으며 피로강도를 크게 향상시켰으나 금속내부에 존재하는 비금속 개재물의 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.
4. 2단 쇼트피이닝에 의한 경도분포는 DIN50CrV4강은 Hv=22~51 증가 하였으나 SAE9254강의 경우는 1단과 2단의 변화가 없었다. 이는 경도가 높은 재료이므로 2단 효과가 나타나지 않은 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- 村上, 大南(1979) : 疲勞力學 入門, オ-ム社, PP 121-127
- A. Wöhler(1967) : Experiments on the strength of metals Engineering, August 23, pp 160
- 黃永澤(1978) ; Spring 鋼材의 破壞舉動에 關한 研究, 慶熙大學校 大學院, PP 2~4
- 柳政吉(1982) ; 反復 疲勞荷重을 받는 鋼材의 疲勞破壞 舉動에 關한 研究, 서울大學校 大學院, pp 1-4
- G.E. Griffith(1920) ; The phenomena of rupture and flow in solids, Trans. R. Soc. Vol. A221, pp 163
- H.F. Moor, J.B. Kommers(1924) ; An investigation of the fatigue of material, Eng, Experiment Sation bulletin, No. 124, pp 178
- 金鎮吉(1981) ; 疲勞強度에 미치는 Shot-peening 處理의 影響에 關한 研究, 慶熙大學校 大學院, pp 1~6
- 橫堀武王(1979) ; 金屬의 疲勞破壞, 丸善, pp 25~32
- 日本金屬學會(1970) ; 金屬便覽, 丸善 pp 471~901
- ばね 技術研究會(1987) ; ばね論文集 제32호, pp 31