

스프링강의 피로진전거동에 미치는 잔류응력의 영향

박경동* · 정찬기**

**부경대학교 기계공학부

**부경대학교 대학원 기계공학과

A Study on The Effect of Residual Stress on Fatigue Propagation Behavior of Spring Steel

Keyung-Dong Park*, Chan-gi Jung**

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

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

KEY WORDS: Shot peening 쇼트 피이닝, Compressive residual stress 압축잔류응력, Rotary bending 회전굽힘, Fatigue strength 피로강도

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, three kinds of spring steel (JISG4081-SUP7, 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) Decreasing the surface roughness
- (2) Unchanging the surface hardness
- (3) Increasing the compressive residual 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 고출력화는 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)

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 방법으로 쓰이고 있는 쇼트 피이닝은 수많은 양의 쇼트 볼을 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 잔류응력층을 표면부 가까이 형성하게 된다.

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

특히 금속 표면에 압축 잔류응력을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 생성과 균열의 전파 억지력을 향상시킨다고 볼 수 있으며, 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표

제1저자 박경동 연락처: 부산시 부경대학교 기계공학부
051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

면부에 되도록 가까이 형성 될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성 될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.(ばね 技術研究會, 1988)

그러나 지금까지 1단 쇼트 피이닝에 의한 압축 잔류 응력의 영향에 대해서는 연구가 진행되고 있으나, 아직 2단 쇼트 피이닝에 의한 고압축잔류응력이 피로 강도에 미치는 영향에 대한 연구는 찾아볼 수 없다.

본 연구에서는 쇼트 피이닝 효과를 극대화 시키기 위하여 스프링강에(JISG4081-SUP7, SAE 9254, DIN 50CrV4) 쇼트 피이닝을 1단, 2단으로 작용시켜 쇼트 피이닝에 의한 기계적 성질의 변화, 경도변화, 조도향상에 의한 표면의 평활화등을 고응력 조건에서 피로강도향상과 피로수명향상등을 통한 재료개발과 이 분야의 안전설계 자료에 기여코자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연강재로서 스프링 강 SAE 9254, DIN 50CrV4, JISG 4081-SUP 7이고, 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	-
SUP7	0.59	0.19	0.84	0.012	0.003	0.03	-	-

시험편을 제작하기 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.

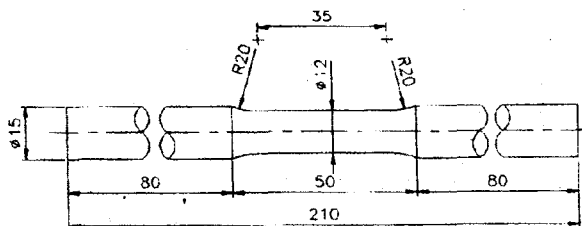


Fig. 1 Dimensions of Specimen

그리고 담금질 완료된 시험편은 다시 연속식 가스 템퍼링노에서, 50CrV4 강재의 경우는 가열온도 370℃, 가열시간 80분을 유지하여 템퍼링 하였고, SAE 9254 및 SUP 7 강재의 경우는 가열온도 420℃, 균열시간 110분을 유지하여 템퍼링 하였다.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile Strength (Mpa)	Hardness(Hb)		Elongation (%)	Reduction of area (%)
		after Quenching	after Tempering		
50CrV4	1795	2.5	2.75	9.4	35.7
SAE9254	1764	2.3	2.75	9.4	36.0
SUP7	1778	2.35	2.75	11.4	41.9

그리고 템퍼링이 완료된 시험편의 표면경도와 진원도를 맞추기 위하여 원통 연삭기에서 연삭을 하였다. 템퍼링된 시험편의 기계적 성질 Table 2 와 같다. 여기서 표시한 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 브리넬 경도값이다.

2.2 실험장치

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

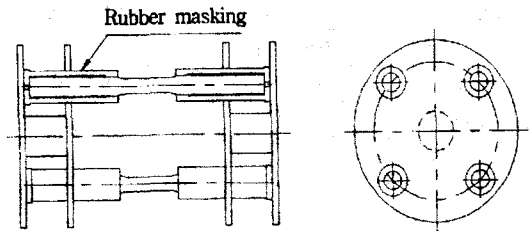


Fig. 2 Fixture of Specimen

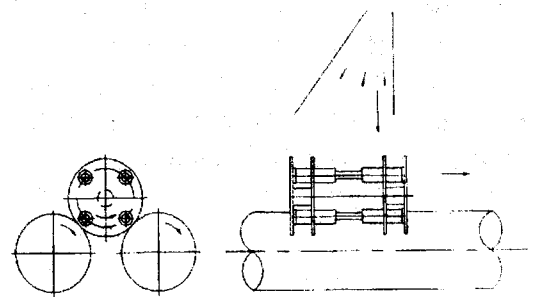


Fig. 3 Shot-Peening apparatus

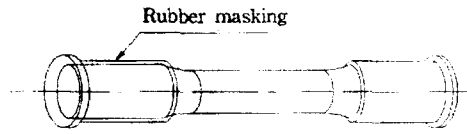


Fig. 4 Rubber masking for specimen

그리고 1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝은 스포링 제조회사인 대원강업(주)가 보유하고 있는 코일스프링 제작용 쇼트 피이닝기와 엔진벨브 스포링 제작용 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 시험편의 양단을 치구로 고정하고 그 치구를 Fig. 3과 같이 2개의 자전 로울러 위에 올려놓고 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.

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 %

2.3 실험방법

2.3.1 압축잔류응력 측정

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

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	Target	Cr-V
X-Ray Source	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 피로시험기로 회전수는 3,400 r.p.m 이며 시험 온도는 20 $^{\circ}$ C에서 실행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 1단 및 2단 쇼트 피이닝에 의한 압축잔류 응력평가

연삭된 시험편의 표면에 쇼트 피이닝하여 표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였다.

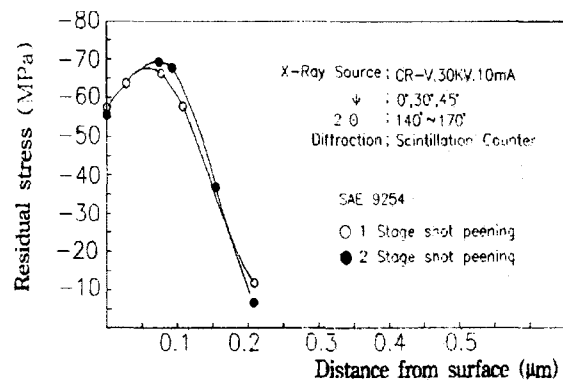


Fig. 5 Residual stress distributions produced by Shot-peening (SAE 9254)

Fig. 5 SAE 9254강의 시험편에 1단 및 2단 쇼트 피이닝을 한 후 표면의 압축 잔류응력을 측정한 결과값으로서 압축 잔류응력이 1단 쇼트 피이닝의 최대값(-670MPa)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다.

그리고, 2단 쇼트 피이닝의 최대값(-700MPa)은 80 μ m 깊이에서 이루어졌다.

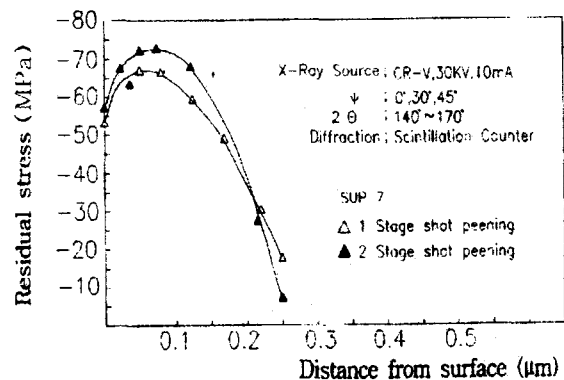


Fig. 6 Residual stress distributions produced by Shot-peening (50CrV4)

Fig. 6은 50CrV4강의 표면에 대한 압축 잔류응력의 분포를 보여주는 결과로서, 표면부 압축 잔류응역이, 1단 쇼트 피이닝에 대한 최대 압축 잔류응력(-720MPa)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다. 그리고 2단 쇼트 피이닝의 최대 압축 잔류응력(-780MPa)값이 100 μ m 깊이에서 이루어지므로 2단쇼트피이닝에 의한 압축 잔류응력층이 한층 더 두터워졌다.

Fig. 7은 SUP 7강에 대한 압축 잔류응력 분포를 나타낸 결과로서, 압축 잔류응력은 1단 쇼트 피이닝 조건의 최대값(-680MPa)이 50 μ m 깊이에서 이루어졌고, 2단 쇼트 피이닝 조건의 최대값(-730MPa)은 80 μ m 깊이에서 이루어졌음을 보여주고 있다.

그리고 2단 쇼트 피이닝이 1단 쇼트 피이닝에 비하여 압축 잔류응력 값이 높게 형성되었음을 나타내 주고 있다.

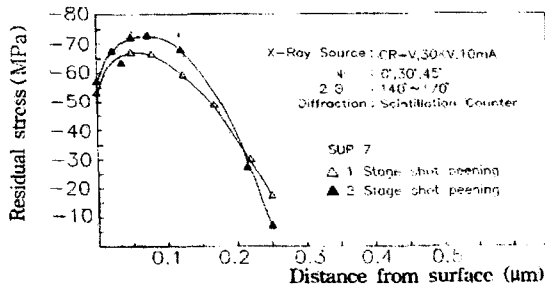


Fig. 7 Residual stress distributions produced by Shot-peening (SUP 7)

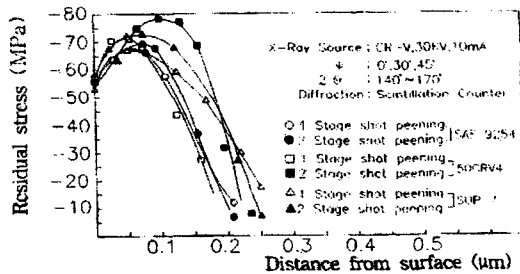


Fig. 8 Residual stress distributions produced by Shot-peening (SAE 9254, 50CrV4, SUP 7)

위와 같이 관찰된 결과값을 종합해 보면, 1단 쇼트 피이닝에 비하여 2단 쇼트 피이닝된 모든 시험편에서 압축 잔류응력의 최대값이 30~60MPa 정도 상승되었고, 형성된 압축 잔류응력 최대값의 깊이도 25~50 μ m 깊어져 전체적인 압축 잔류응력 형성층이 넓게 증가되어 있음을 Fig. 8에서 나타냈다.

3.2 쇼트피이닝이 표면조도에 미치는 영향

1단 쇼트피이닝 후 조도값 Ra는 1.798~2.37 μ m이고

Rmax은12.22~13.00 μ m로 분포되었고, 2단 쇼트 피이닝 후 조도값 Ra는 1.099~1.937 μ m이고 Rmax는 7.55~11.12 μ m로 분포되었으며 Fig. 9에 그 결과를 나타내었다.

이 결과를 보면 2단 쇼트피이닝에 의해 조도가 크게 향상되었음을 알 수 있다.

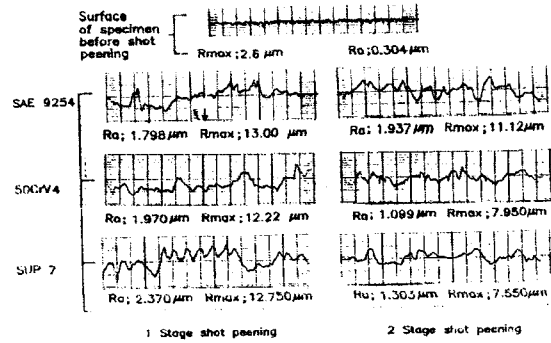


Fig. 9 Roughness pattern of shot peened specimen

3.3 압축잔류응력이 경도분포에 미치는 영향

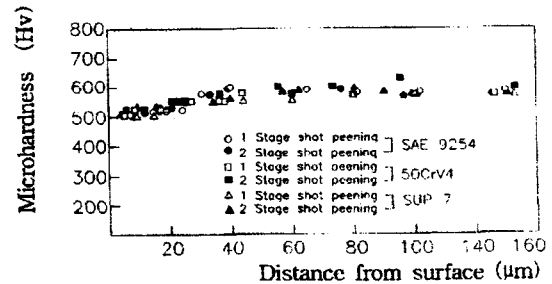


Fig. 10 Hardness distributions produced by Shot-peening(SAE 9254, 50CrV4, SUP 7)

각 스프링 재료에 있어서 표면부위와 경도(Hv)의 관계를 Fig. 10 나타내었다. 경도(Hv)의 값은 503~637로 1단 쇼트피이닝과 2단 쇼트피이닝의 열처리된 스프링강에서는 표면 경도는 큰 차이가 나타나지 않았다.

3.4 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향

1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리된 시험편에 대한 피로수명을 고찰하였다. 이때 피로강도는 최소 ± 760 MPa, 최대 ± 870 MPa을 적용하였으며 Fig. 11, Fig. 12, Fig. 13는 SAE 9254, 50CrV4, SUP 7강에 대한 회전 굽힘 피로시험의 S-N 선도이고 Fig 14는 3종류의 강종에 대한 종합 S-N 피로시험 선도를 나타내었다.

그리고 실험은 피로 반복회수를 $10^3 \sim 10^7$ 회의 범위에서 실행하였다. 시험편의 1단 쇼트 피이닝 과 2단 쇼트 피이

닝의 효과를 관찰해 보면, 1단 쇼트 피이닝된 시험편은 본 피로시험의 최소 응력인 $\pm 760\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1520\text{MPa}$) 부근에서 SAE 9254는 46만회, 50CrV4는 46만회, SUP 7은 41만회에서 파손된다는 것이 관찰되었다.

그리고 2단 쇼트 피이닝된 시험편은 본 시험의 1단 때와 동일한 작용 최소 응력인 $\pm 760\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1520\text{MPa}$)에서 SAE 9254가 250만회, 50CrV4는 320만회, SUP 7은 230만회 진행에도 파손되지 않았으며, 이때 1단 쇼트피이닝에 비해 2단 쇼트 피이닝의 피로수명이 5.4~7배 향상되었다.

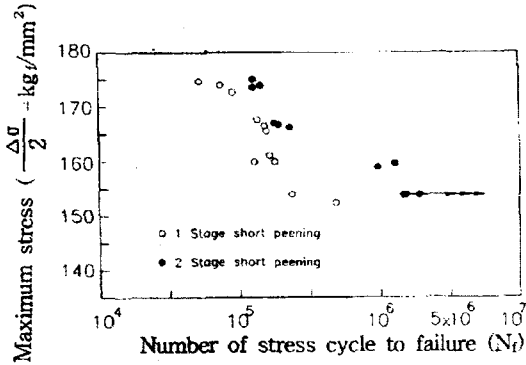


Fig. 11 Rotary bending fatigue S-N curves for SAE 9254 specimen

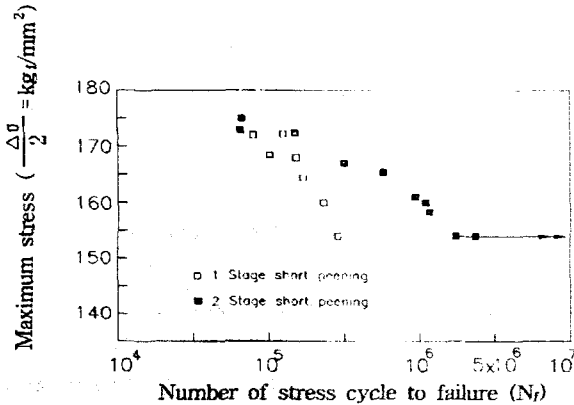


Fig. 12 Rotary bending fatigue S-N curves for 50CrV4 specimen

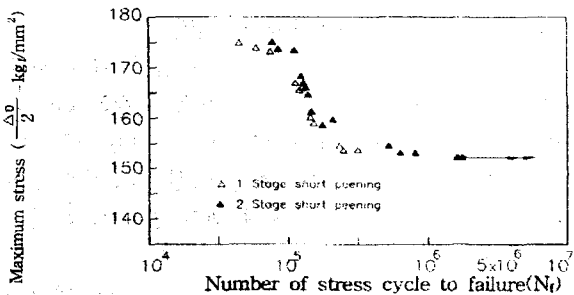


Fig. 13 Rotary bending fatigue S-N curves for SUP 7 specimen

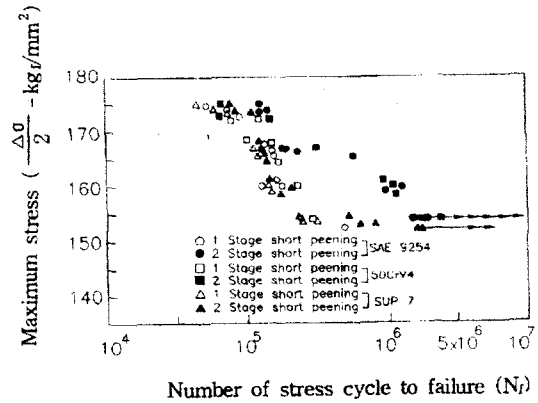


Fig. 14 Rotary bending fatigue S-N curves for SAE 9254, 50CrV4, SUP 7 specimen

그리고 피로시험의 최고 응력이 $\pm 870\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1740\text{MPa}$)에서의 1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리된 조건의 모든 시험편에서의 피로수명이 다소 편차는 있으나 10만회 부근에서 파손되었으며, SAE 9254 와 50CrV4는 피로시험의 최소 응력까지 점진적인 피로수명 증가 상태를 보여 주고 있으나, SUP7 강은 최대응력인 $\pm 870\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1740\text{MPa}$)에서부터 $\pm 800\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1600\text{MPa}$)까지 점차적인 피로시험 적용 응력을 낮추어 피로시험을 진행하여도 작용응력 $\pm 800\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1600\text{MPa}$)이하에서 피로수명이 급격히 증가되었음을 알 수 있다.

3.5 파단면관찰

피로시험 진행중 1단 쇼트 피이닝 조건과 2단 쇼트 피이닝 조건에서 강종별로 Fig. 14의 S-N 선도상 정상 피로회수를 나타내는 시험편을 샘플링하여 주사형 전자현미경, HITACHI사 S-2150으로 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 1단 및 2단 쇼트 피이닝 조건 모두 피로 기점이 표면에서 시작하여 내부로 진행되는 정상적인 피로파단면을 나타내고 있다.

그리고 Fig. 21은 2단 쇼트 피이닝된 시험편인 SAE 9254 강종으로서 피로응력이 $\pm 800\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1600\text{MPa}$)인 상태에서 피로회수 24만회 진행중 조기절손된 단면을 SEM으로 관찰한 사진이다. 이 조건의 정상적인 피로회수는 Fig. 14의 S-N 선도상에서 120만회 부근이다.

위와 같은 조기파단은 표면으로부터 0.5mm 깊이에 크기가 $42\mu\text{m}$ 인 비금속 개재물을 기점으로 하여 파단 되었음이 관찰되었다.

Fig. 22 역시 조기 파단으로서 2단 쇼트 피닝된 50CrV4 강종의 시험편이고, 응력은 $\pm 830\text{MPa}$ ($\Delta\sigma/2 = 1660\text{MPa}$)일 때 피로회수 77600회 진행 중 파단된 단면은 표면으로부터 0.8mm 깊이에 22 μm 크기로 존재하는 비금속 개재물을 기점으로 하여 피로파괴가 진행되었음이 확인되었다.

이 시험편은 앞서 제시한 S-N 선도(Fig. 14)에 의하면 56만~76만회 파단되는 것이 정상 피로파괴로 보여지나 조직내부의 비금속 개재물에 의해 77600회에서 조기결손된 것이다.

위에서 거론된 조기 파단면상에서 관찰된 비금속 개재물은 EDS(Energy dispersive Spectrometer, KEVEX INSTRUMENT, SIGMA-3)로 분석한 결과 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 판명되었으며 그 결과를 Fig. 23, 24에 나타내었다.



Fig. 15 SEM photographs of fracture surface around crack 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

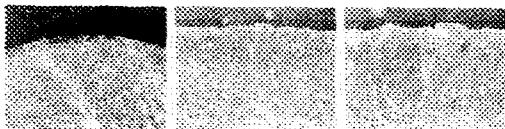


Fig. 17 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 1 stage shot-peened



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



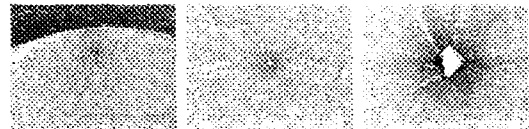
Fig. 19 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP 7 under 1 stage shot-peened



Fig. 20 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP 7 under 2 stage shot-peened



Specimen : SAE 9254
Condition : 2段 Shot-Peening
Fatigue Limit : $\Delta\sigma/2 : 1600\text{MPa}$ ($\pm 800\text{MPa}$)
Number of Cycles : 240,000 r.p.m.
Fig. 21 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta\sigma/2 = 1600\text{MPa}$



Specimen : DIN 50CrV4
Condition : 2段 Shot-Peening
Fatigue Limit : $\Delta\sigma/2 : 1660\text{MPa}$ ($\pm 830\text{MPa}$)
Number of Cycles : 77,600 r.p.m.
Fig. 22 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta\sigma/2 = 1660\text{MPa}$

이와 같이 고응력을 받는 재료는 표면에서 파단될 수 있는 구조(탈탄, 균열, 경화)가 많아 대개의 피로파괴 기점이 표면에서 이루어진다. 따라서 1단 쇼트 피닝 조건의 경우는 금속내부에 존재하는 비금속 개재물을 기점으로 하여 파단되는 현상이 없었으나, 2단 쇼트 피닝된 시험편이 비금속 개재물에 의해 피로파괴되는 현상은 표면의 압축잔류응력 증가 및 표면조도 개선에 따른 피로 균열전파 억제력 향상에 기인한다고 보며, 비금속 개재물의 파괴에 대한 영향 평가는 여러 학자에 의하여 보고되어 있다 (W.E.Dudsworth, 1964; H.N.Cummings, 1959).

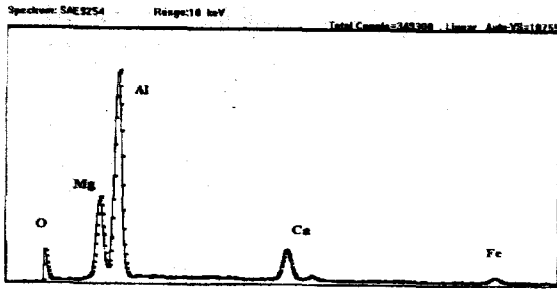


Fig. 23 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (SAE 9254)

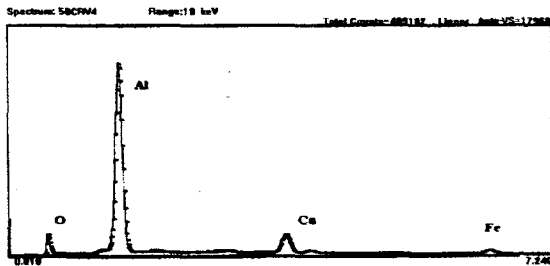


Fig. 24 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (50CrV4)

5. 결 론

스프링강 SAE9254, DIN50CrV4, JISG4081 -SUP7등 3종류를 열처리한 후 1단 쇼트 피이닝과 2단 쇼트 피이닝 시험편으로 구분하여 기계적성질, 표면조도의 변화, 표면경도 분포, 잔류응력분포측정 및 회전굽힘피로 시험을 통하여 1단과 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 피로 수명에 미치는 영향과 파단면 관찰을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 각 시험편을 1단 및 2단 쇼트피이닝을 하여 표면조도를 측정된 결과 평균조도(Ra)와 최고조도(Rmax) 값은 1단 쇼트피이닝에서 Ra가 1.798 ~ 2.37mm로 2단 쇼트피이닝 하여 Ra가 28%, Rmax가 30%향상되었다.
2. 3종류의 스프링강을 1단 및 2단 쇼트피이닝한 후 표면 경도시험 한 결과

SAE 9254재가	1단 일 때 Hv 503~605
	2단 일 때 Hv 503~595,
50CrV4재가	1단 일 때 Hv 503~586
	2단 일 때 Hv 525~637
SUP7재가	1단 일 때 Hv 503~575
	2단 일 때 Hv 514~595

으로 50CrV4재와 sup7재가 2단 쇼트피이닝으로 경도 11~51증가하였으며 SAE9254재의 경도는 큰 변화가 나타나지 않았다. 이는 원래 경도가 높은 재료이기 때문에

큰 변화가 없는 것으로 생각된다.

3. 1단 쇼트피이닝에 비해 2단 쇼트피이닝한 재료의 압축 잔류응력이 30~60MPa 상승하고 깊이도 25~50mm깊이 압축잔류응력 형성층이 넓게 증가되었다.
4. 회전굽힘응력 ± 760 MPa에서 1단 쇼트피이닝에 의한 피로반복횟수는 SAE 9254가 46만회 50CrV4가 46만회 Sup7가 41만회 였으나 2단 쇼트피이닝에 의해 SAE 9254가 250만회 50CrV4가 320만회 sup7이 230만회 반복해도 파괴되지 않았다. 2단 쇼트피이닝에 의한 피로 반복회수가 5.4배~7배 향상되었다. 이 결과로 스프링강 가공에서 2단 쇼트피이닝의 효과가 크게 나타났으므로 2단 쇼트피이닝에 의한 가공법은 새로운 개발이라 할 수 있다.

참고 문헌

- [1] 촌상, 대남(1979) : 피로역학 입문, 오-ム社, pp. 121-127
- [2] 日本金屬學會(1970) ; 金屬便覽, 丸善 pp.471~901
- [3] ばね 技術研究會(1987) ; ばね論文集 제32호, p.31
- [4] SAE Manual ; SAE Manual on shot-peening, SAE J 808a
- [5] ばね 技術研究會(1988) ; ばね論文集 제33호, p.53
- [6] W.E.Dudsworth(1964) ; Metallurgia, 69, 412 p.53
H.N.Cummings(1959) ; WADC Tech. Rep., PB161144, p.59
- [7] A. Wöhler(1967) : Experiments on the strength of metals Engineering, August 23, p.160
- [8] 黄永澤(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
- [9] 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
- [10] G.E. Griffith(1920) ; The phenomena of rupture and flow in solids, Trans. R. Soc. Vol. A221, p.163
- [11] H.F. Moor, J.B. Kommers(1924) ; An investigation of the fatigue of materal, Eng. Experiment Sation bulletin, No. 124, p.178
- [12] 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
- [13] 横堀武王(1979) ; 金屬의 疲勞破壞, 丸善, pp.25~32
- [14] 日本金屬學會(1970) ; 金屬便覽, 丸善 pp.471~901
- [15] ばね 技術研究會(1987) ; ばね論文集 제32호, p.31