

DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향

박경동 · 정찬기*

부경대학교 기계공학부, *부경대학교 대학원 기계공학과

The Effect of Compressive Residual Stresses on Fatigue Strength in DIN50CrV4-SAE9254 Steel

KYUNG-DONG PARK AND 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, Compressive residual stress 압축잔류응력, Rotary bending fatigue test 회전굽힘 피로시험, Fatigue life 피로수명

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 used. 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 1st stage shot peening is not affected by nonmetallic inclusion under metal. (2) it is possible that the 2nd stage shot peening increases the fatigue life and the high stress but that is affected by nonmetallic inclusion under metal. (3) so far becasily DIN50CrV4 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 등은 경량화에 의하여 부재는 더욱 고강도화를 요구한다. 따라서 사용되는 재료, 특히 철강재는 고강도화에서 내구성을 갖어야 된다는 것이 필수적인 사항이다.

그러나 부품에 반복되는 하중 즉 피로하중이 작용함에 따라 어느 순간 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다(村上, 1979; 박, 2000).

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 복잡하게 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 고강도화가 요구되는 현 시점에서는 철강재 내

부에 피로파괴의 원인이 되는 비금속 개재물이 존재치 않아야 하고 한편 철강재 표면에는 탈탄이 없어야하는 것이 필수적인 사항으로 지적되고 있다(日本技術研究會, 1987).

이와 같이 피로강도 저하의 인자중 철강재의 내부 비금속 개재물의 함유를 제외한 나머지 인자들은 철강재의 표면부위의 결함인 되기 때문에 철강재 표면부위의 결함을 제거하고 표면부위의 피로강도 향상을 위한 여러 방법이 쓰이고 있다. 그중 쇼트 피이닝은 수많은 양의 쇼트 볼을 일정한 속도로 금속 표면에 투사하는 것으로서, 쇼트볼에 의해 타격된 금속 표면은 요철면을 이루게 되고, 요철의 깊이는 대개 0.13~ 0.16mm 정도이며, 또한 표면은 소성 가공에 의한 가공경화층과 압축 잔류응력층을 표면 부 가까이 형성하게 된다. 여기에서 가공경화에 따른 경도의 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 역지력을 향상시킨다고 볼 수

있으며, 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성 될 수 있도록 하고, 또 압축 잔류응력이 높게 형성 될수록 피로수명은 향상된다고 알려져 있다.(黃永澤,1978)

지금까지 1단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력의 연구는 있었으나 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력이 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 평활화 등을 고응력 조건에서 피로수명으로 비교 고찰하여 쇼트 피이닝 효과를 스프링 최적 설계에 이용코자한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

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

시험편을 제조하기 위하여 와이어 로드 상태의 재료를 센터리스 바 터닝 머신에서 직선화 및 1차 표면 질삭 가공을 실행하였다(서창민, 1996).

1차 표면 질삭 가공된 재료는 Fig. 1과 같은 시험편 형상을 선반에서 연삭 여유 0.5mm를 주고 2차 가공한 후, 전기로에서 880℃로 30분간을 가열한 후 유중에서 담금질하였다(서창민, 1997).

그리고 담금질 한 시험편은 다시 연속식 가스 템퍼링노에서, DIN50CrV4 강재의 경우는 가열온도 370℃, 가열시간 80분을 유지하여 템퍼링하였고, SAE 9254 강재의 경우는 가열온도 420℃, 균열시간 110분을 유지하여 템퍼링하였다.

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

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

Table 1 Chemical composition of Specimen(wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
SAE9254	0.55	1.36	0.7	0.01	0.002	-	0.68	
50CrV4	0.50	0.27	0.82	0.02	0.005	-	0.10	0.117

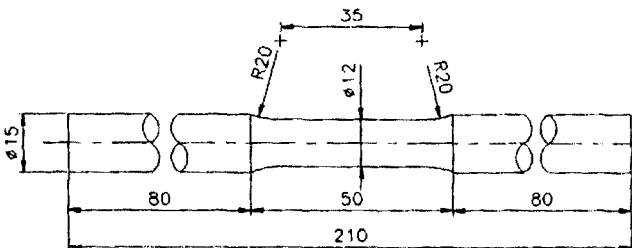


Fig. 1 Dimensions of specimen (unit: mm)

여기서 표시한 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 브리넬 경도값(Ball Dia. : 10mm, 하중: 29.4KN)이다.

2.2 실험장치

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

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 시험편의 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. 4와 같이 시험편 양단(자루부분)을 고무 마개로 씌운 후 실시 하였다.

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile Strength (MPa)	Hardness(HRC)		Elongation (%)	Reduction of area (%)
		after Quenching	after Tempering		
SAE9254	1764	2.3	2.75	9.4	36.0
50CrV4	1795	2.5	2.75	9.4	35.7

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 %

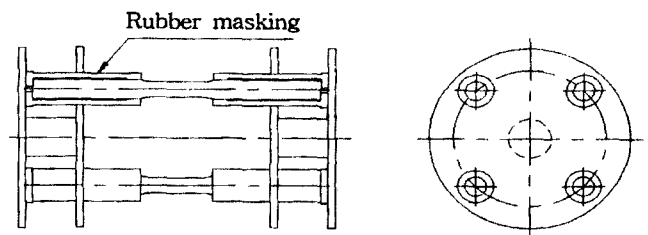


Fig. 2 Fixture of specimen

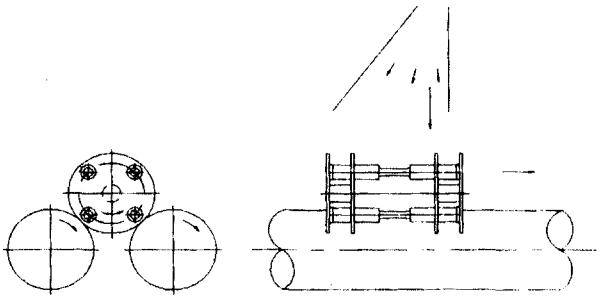


Fig. 3 Shot-peening apparatus

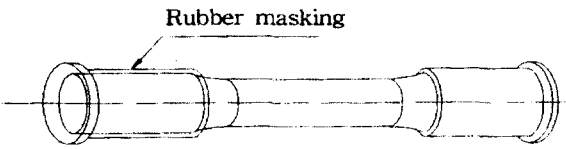


Fig. 4 Rubber masking for specimen

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 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.

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℃ 상태에서 실행하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 영향

연삭된 시험편의 표면에 1단 및 2단 쇼트 피이닝하여 금속표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였다. 쇼트피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X선 잔류응력 측정기 (RIGAKU-MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10 ~ 20 μ m 단위로 연마해 가면서 Table 4와 같은 X선 측정조건 하에서 잔류응력을 측정 하였다.

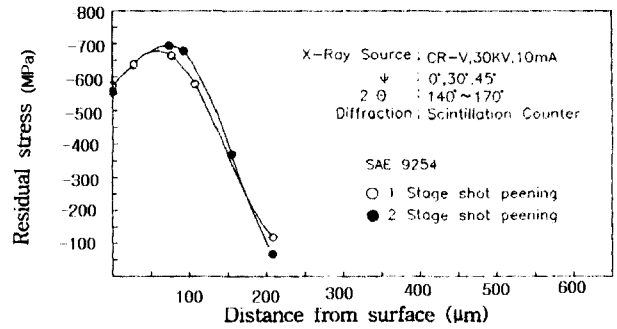


Fig. 5 Residual stress distributions produced by Shot-peening

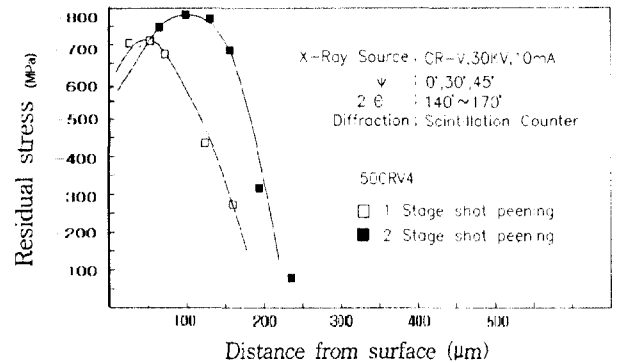


Fig. 6 Residual stress distributions produced by Shot-peening

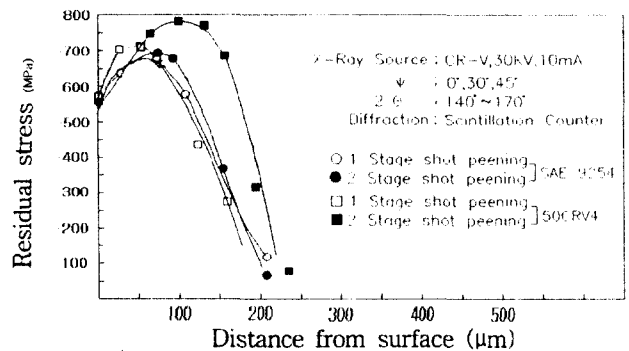


Fig. 7 Residual stress distributions produced by Shot-peening

Fig. 5는 압축 잔류응력 분포로 SAE 9254 강종의 시험편에 1 단 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(-670MPa)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다.

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

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(-720MPa)은 50 μ m 깊이에서 이루어졌다. 그리고 2단 쇼트 피이닝의 최대 압축 잔류응력(-780MPa)값이 100 μ m 깊이에서 이루어지므로써 압

축 잔류응력층이 한층 더 두터워졌다.

Fig. 7은 Fig. 5, 6을 다시 정리하여 나타낸 것으로 Fig. 5, 6는 SAE 9254, DIN 50CrV4 강종에 대한 1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리 후 금속 표면에 형성된 압축 잔류응력 깊이별로 조사한 값으로서 1단 쇼트 피이닝 처리조건인 잔류응력값은 극표면부에서 -560MPa ~ -580MPa이며, 최대값은 50 μ m 깊이에서 -670MPa, 70 μ m 깊이에서 -720MPa로 조사 되었고, 2단 쇼트 피이닝 처리조건인 압축잔류응력 값은 극표면부에서는 1단과 쇼트피이닝 처리조건과 변화가 없었으나 최대값은 80 μ m 깊이에서 -700MPa, 100 μ m 깊이에서 -780MPa으로 이루어져 1단과 2단 쇼트피이닝 처리조건을 비교하면 극표면부의 압축잔류응력의 변화는 없으며, 잔류응력 최대값은 -30 ~ -60MPa로 증가되었고, 압축잔류응력 최대값 형성 깊이도 10 ~ 50 μ m으로 깊어져 압축잔류응력층을 넓게 증가시킴을 알수 있다.

3.2 쇼트피이닝과 경도분포 관계

Fig 8, 9는 SAE9254, DIN50CrV4 강의 1단 및 2단 쇼트피이닝 후 깊이별 경도 분포를 나타내었다. 경도조사를 위해 시험편 단면을 열경화성 수지에 고정하고, 다이아몬드 페이스트(3 μ m)로 포리싱 하였으며, 경도 조사는 마이크로 비커스 경도계를 이용하여, 극표면부에서 20 μ m 깊이까지를 측정하중 25g을 적용하였고, 20 μ m에서 150 μ m 깊이까지는 300g을 적용 하였다.

1단과 2단 쇼트피이닝 처리조건에서의 경도값 변화를 압축 잔류 응력의 최대값 형성 깊이에서 비교하면 SAE9254강종에서 1 단 쇼트피이닝이 50 μ m 깊이에서 Hv=600이고, 2단쇼트피이닝이 70 μ m 깊이에서 Hv=595으로 경도 변화가 없었으며, DIN50CrV4강

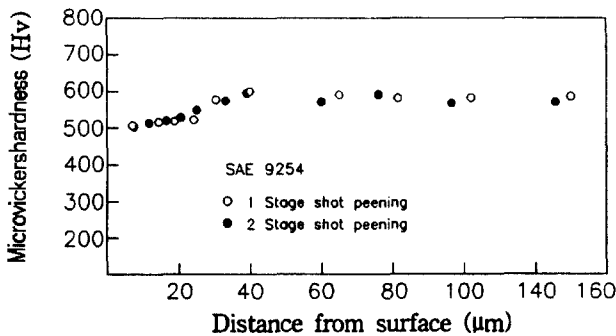


Fig. 8 Hardness distributions produced by Shot-peening (SAE9254)

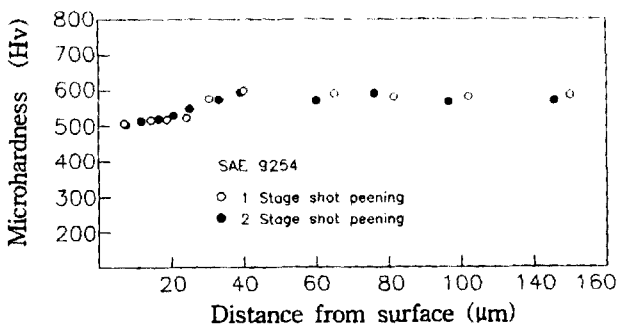


Fig. 9 Hardness distributions produced by Shot-peening (50CrV4)

종에서 1단쇼트피이닝이 80 μ m 깊이에서 Hv=586이고, 2단쇼트피이닝이 100 μ m 깊이에서 Hv=637로 조사되어 Hv=50정도의 경도 값이 증가 되었음을 알 수 있다.

3.3 피로수명에 미치는 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력의 영향

1단 및 2단 쇼트 피이닝 처리된 시험편에 대한 피로수명을 조사하였다. 이때 피로강도는 최소 \pm 760 MPa, 최대 \pm 870 MPa 적용하였으며, Fig 10, Fig 11 및 Fig 12는 각각 SAE 9254, 50CrV4 강종에 대한 회전 굽힘 피로시험의 S-N 선도다. 그리고 실험은 피로 반복회수를 $1 \times 10^3 \sim 2 \times 10^6$ 회의 범위에서 실행하였다. 반복피로시험 결과 1단 쇼트피이닝 처리된 SAE9254, DIN50CrV4 강종에 대한 피로수명을 최대응력 \pm 870 MPa에서 6만회, 8만회에 파단되었으며, 최소 응력 \pm 760 MPa에서는 65만회, 46만회에 파단되었다. 2단 쇼트피이닝 처리된 SAE9254, DIN50CrV4 강종에 대한 피로수명은 최대응력 \pm 870 MPa에서 10만회, 8만회에서 파단 되었고, 최소 응력 \pm 760 MPa에서는 250만회, 320만회에서 절손되어 1단 쇼트피이닝 처리보다 2단 쇼트피이닝 처리된 시험편의 피로수명은 3.5 ~ 6.5배 향상 되었다.

3.4 피로 파단면의 고찰

피로시험중 파단된 시험편 중 1단 쇼트 피이닝 조건과 2단 쇼

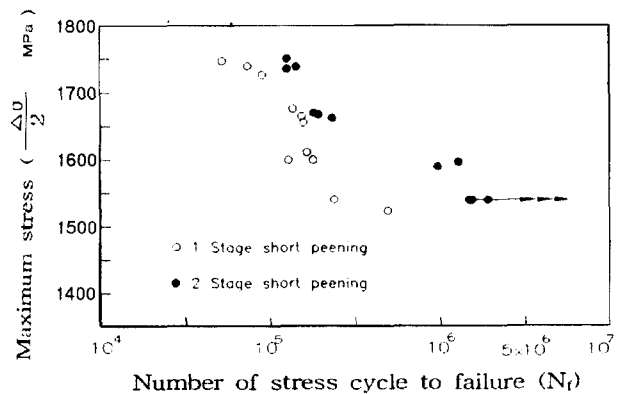


Fig. 10 S-N curves for SAE9254 specimen

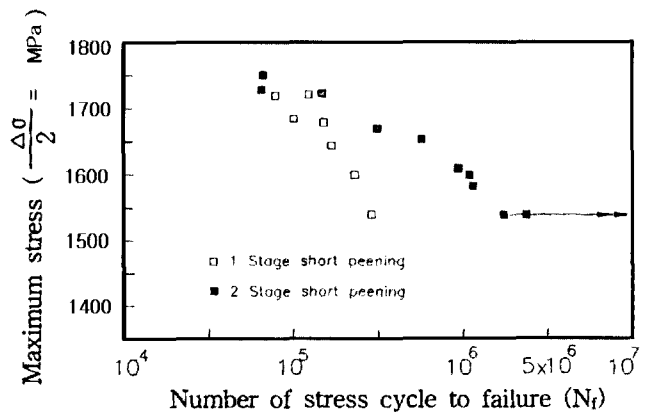


Fig. 11 S-N curves for 50CrV4 specimen

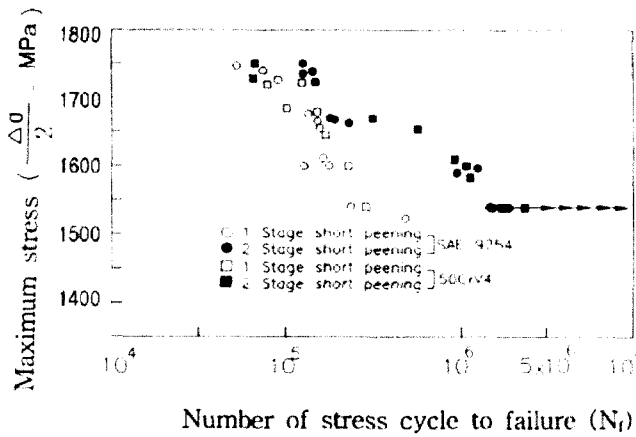


Fig. 12 S-N curves for SAE 9254, 50CrV4 specimen

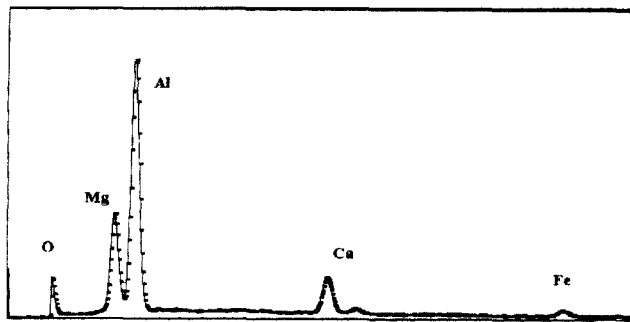


Fig. 13 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (SAE 9254)

트 피이닝 조건의 S-N 선도(Fig. 10)상 정상 피로회수를 나타내는 시험편을 샘플링하여 SEM (주사형 전자현미경, Scanning Electron Microscope, HITACHI 社 S-2150) 으로 관찰하였다.

Fig 15, 17은 1단 쇼트 피이닝된 시험편의 강종별 피로 파단면이고, Fig 16, 18 은 2단 쇼트 피이닝된 피로파단면에 대한 SEM 사진이며, 사진의 배율은 30배, 400배 순으로 배열하였다.

관찰된 사진을 고찰해 보면 1 단 및 2단 쇼트 피이닝 처리과 단 현상이 표면을 기점으로 하여 내부로 진행되는 정상적인 피로파단면을 나타내고 있으나, Fig. 19, 20에서는 2단 쇼트 피이닝된 SAE9254, DIN50CrV4 강종 모두 표면으로부터 0.5mm, 0.8mm 깊이에 42 μ m, 22 μ m 크기의 비금속 개재물이 관찰 되었다. 이 시험편은 2단 쇼트피이닝된 시험편으로서 피로파단을 응력 ± 800 MPa, ± 830 MPa 상태에 24만회, 77,600회에서 조기파단 되었다. 이현상을 고찰해 보면 응력 ± 800 MPa이하에서는 1단 쇼트피이닝보다 2단 쇼트피이닝이 피로강도를 3.5 ~ 7배 향상시키지만, 2단 쇼트피이닝을 하여도 응력 ± 800 MPa이상에서는 금속 내부에 존재하는 비금속 개재물에 의하여 조기 파단 된다는 것이 고찰 되었다.

이와같이 응력 ± 800 MPa이하에서는 금속표면의 압축잔류응력 증가는 피로 균열 전파 역지력에 기여하고 있지만 고응력하

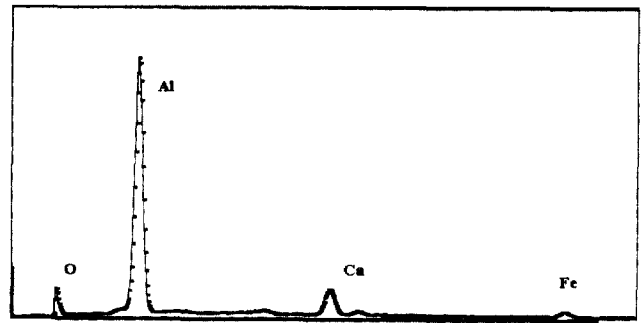


Fig. 14 Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (50CrV4)

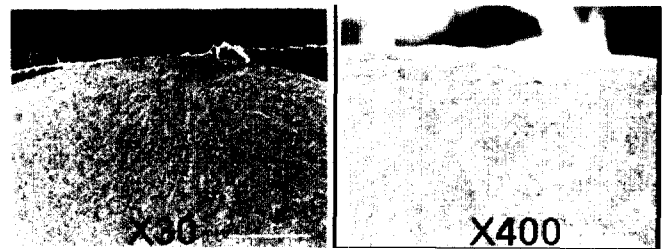


Fig. 15 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SAE 9254 under 1 stage shot-peened

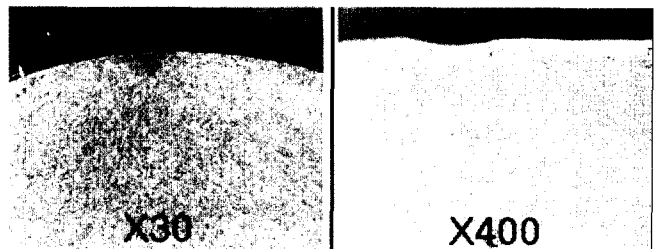


Fig. 16 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SAE 9254 under 2 stage shot-peened

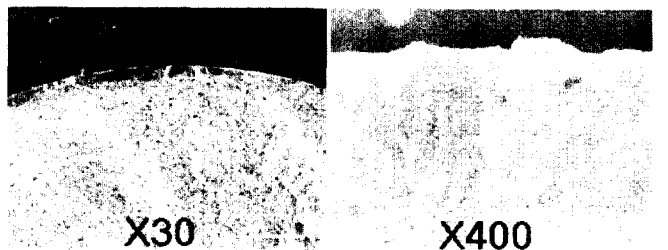


Fig. 17 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 1 stage shot-peened

에서는 금속의 표면보다는 금속내부에 존재하는 비금속 개재물의 영향이 크다고 볼수 있으며, 이 비금속 개재물에 대한 영향 평가는 여러 학자에 의해 보고 되어지고 있다. 위에서 관찰된 파단면의 비금속 개재물은 EDS(energy dispersive Spectrometer,

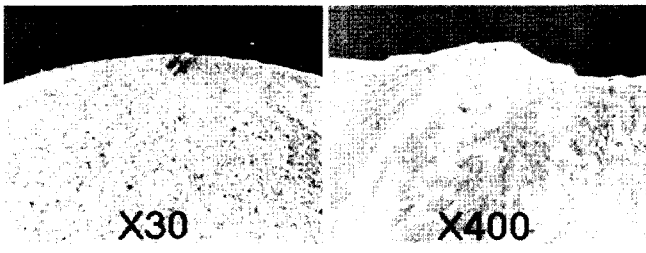


Fig. 18 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 2 stage shot-peened
 specimen : SAE 9254
 Condition : 2단 Shot-Peening
 Fatigue Limit : $\Delta \sigma/2$: 1600MPa(± 800 MPa)
 Number of Cycles : 240,000

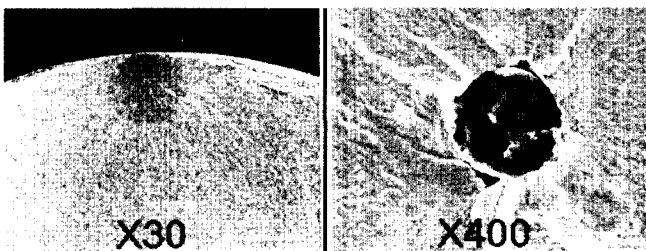
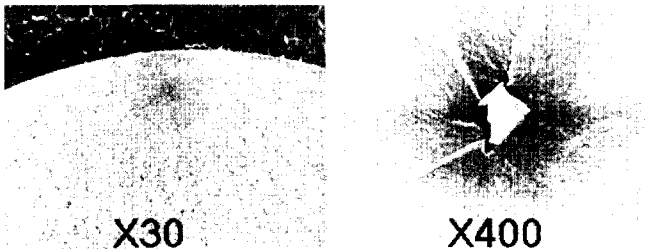


Fig. 19 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta \sigma/2 = 1600$ MPa



Specimen : DIN 50CrV4
 Condition : 2단 Shot-Peening
 Fatigue Limit : $\Delta \sigma/2$: 1660MPa (± 830 MPa)
 Number of Cycles : 77,600

Fig. 20 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under $\Delta \sigma/2 = 1660$ MPa

KEVEX INSTRUMENT, SIGMA-3)로 분석에 의하여 산화 알루미늄(Al_2O_3)으로 판명되었으며 그 결과는 Fig. 13, 14에서 보여주고 있다. 이 Al은 강을 Killed강으로 제작할 때 투입되는 Al에 의한 것이다.

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 구

분하여 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 30~60MPa 향상되었으며 압축잔류응력의 깊이도 25~50 μm 깊어져 압축잔류응력 형성층이 넓게 증가하였다.
- (2) 반복 굽힘 응력 ± 760 MPa에서 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 스프링강의 제작에 2단 쇼트피이닝의 효과가 크게 나타나 2단 쇼트피이닝에 의한 제작 기술을 개발하였다.
- (3) 2단 쇼트피이닝에 의해 표면의 잔류응력층이 넓게 형성되어 표면조도 상태를 향상키므로 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

박경동 등(2000). "압력용기용 강의 저온 피로크랙 하한계 특성에 관한 연구(II)", 한국해양공학회 논문집, 제14권 제3호, pp 78~83.

서창민·오명석(1996). "2024-T3 및 황동의 작은 표면결합체의 피로균 성장 특성에 관한 연구", 한국해양공학회 논문집, 제10권 제1호, pp 53~64.

서창민·오명석(1997). "TiN 코팅 공정 개선에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강재의 피로강도 특성", 한국해양공학회 논문집, 제11권 제4호, pp 49~60.

A. Wöhler(1967). Experiments on the strength of metals Engineering, August 23, p 160.

G.E. Griffith(1920). The phenomena of rupture and flow in solids, Trans. R. Soc. Vol. A221, p 163.

H.F. Moor, J.B. Kommers(1924). An investigation of the fatigue of material, Eng. Experiment Station bulletin, No. 124, p 178.

村上, 大南(1979). 疲勞力學 入門, オ-ム社, pp 121~127.

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.

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, p 31.

SAE Manual ; SAE Manual on shot-peening, SAE J 808a.
ばね 技術研究會(1988). ばね論文集 제33호, p 53.
ばね 技術研究會(1982). ばね 第3版, 丸善, p 540.
W. E.Dudsworth(1964). Metallurgia, 69, 412 p 53.

H.N.Cummings(1959). WADC Tech. Rep., PB161144, p 59.

2001년 4월 23일 원고 접수
2001년 6월 22일 수정본 채택