

SUP7-50CrV4강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향

박경동 · 정찬기*
부경대학교 기계공학부
*부경대학교 대학원 기계공학과

The effect of compress residual stresses for fatigue strength of SUP7-50CrV4 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, Rotary bending 회전굽힘, Fatigue strength 피로강도, Wire rod 와이어로드, 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 (SUP7, 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 on low stress condition, the 1st stage shot peening is not affected by nonmetallic inclusion under metal. 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. so far beeasily 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 등은 경량화에 의하여 부재는 더욱 고응력화를 요구한다. 따라서 사용되는 재료, 특히 철강재는 고응력화에서 내구성을 가져야 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)

이와 같이 피로파괴와 관련된 각종 인자의 연구와 파괴거동에 대한 연구가 활발히 행해지고 있으며, 근래에는 피로강도를 향상시킬 수 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 고응력화가 요구되는 현 시점에서는 철강재 내부에 피로파괴의 원인이 되는 비금속 개재물이 존재치 않아야 하고, 또한 철강재 표면에는 탈탄이 없어야 하는 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 여러 방법이 쓰이고 있다. 그중 쇼트 피이닝은 수많은 양의 쇼트 볼을 일정한 속도로 금

속 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 잔유응력층을 표면부 가까이 형성하게 된다(G.E.Griffith,1920)

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(黃永澤,1978)

지금까지 1단 쇼트피이닝에 의한 압축잔유응력의 연구는 있었으나 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔유응력이 피로강도에 미치는 영향에 대한 연구는 거의 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 이용코저 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 와이어로드 상태의 압연강재로서 스프링 강(SUP7, 50CrV4)이고, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1 Chemical composition of specimen(wt, %)

	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	V
JISGSUP7	0.59	0.19	0.84	0.012	0.003	0.03	-	-
50CrV4	0.50	0.27	0.82	0.02	0.005	-	0.10	0.117

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

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 담금질 하였다.

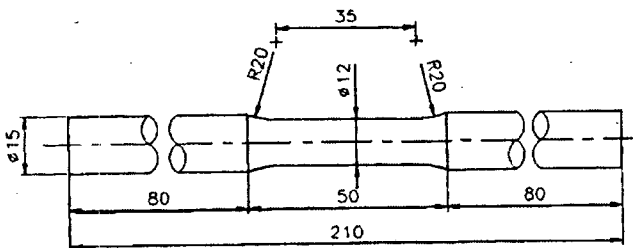


Fig. 1 Dimensions of specimen(unit:mm)

그리고 담금질 한 시험편은 다시 연속식 가스 템퍼링노에서, 50CrV4 강재의 경우는 가열온도 370℃, 가열시간 80분을 유지하여 템퍼링하였고, SUP7 강재의 경우는 가열온도 420℃, 균열 시간 110분 유지하여 템퍼링 하였다.

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.

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

Table 2 Mechanical properties of specimen

Material	Tensile Strength (MPa)	Hardness(HRC)		Elongation (%)	Reduction of area (%)
		after Quenching	after Tempering		
SUP7	1742.0	61.7	51.6	11.4	41.9
50CrV4	1759.1	59.1	51.6	9.4	35.7

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 엔진벨브 스프링 제조용 쇼트 피이닝기를 사용하였으며, 그 조건은 Table 3과 같다(H.J.Plaster). 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 쇼트 피이닝기에서 쇼트 피이닝을 하기 위해 Fig. 4와 같이 시험편 양단(자루부분)을 고무 마개로 씌운 후 실시 하였다.

Table 3 Conditions of shot-peening

Condition	1 Stage	2 Stage
	Shot- Peening	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 %

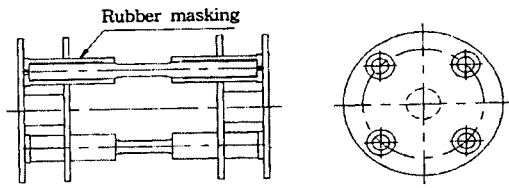


Fig. 2 Fixture of specimen

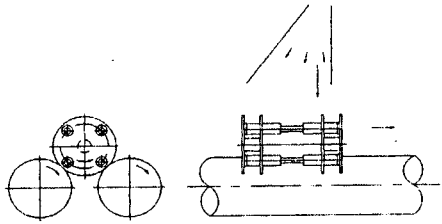


Fig. 3 Shot-peening apparatus

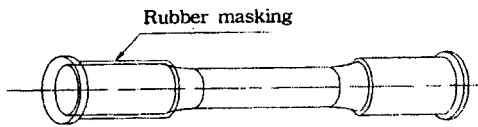


Fig. 4 Rubber masking for specimen

2.3 시험방법

2.3.1 잔류응력

쇼트 피이닝된 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 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°		
2θ	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 실내 온도 20 $^{\circ}$ C 상태에서 실행하였다(류정길,1982)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 1단 및 2단 쇼트피이닝에 의한 압축잔류응력의 분포

연삭된 시험편의 표면에 1단 및 2단 쇼트 피이닝하여 금속 표면에 형성된 압축 잔류응력을 측정하였다(H.O.Fuchs.editor: PP316-333).

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, 6는 SUP7, 50CrV4 강종에 대한 1단 및 2단 쇼트피이닝 처리 후 금속 표면에 형성된 압축 잔류응력 깊이별로 조사한 값으로서, 1단 쇼트 피이닝 처리조건인 잔류응력값은 극표면부에서 -540MPa ~ -580MPa이며, 최대값은 50 μ m 깊이에서 -660MPa, 70 μ m깊이에서 -720MPa로 조사 되었다.

2단 쇼트 피이닝 처리조건의 압축잔류응력 값은 극표면부에서는 1단과 쇼트피이닝 처리조건과 변화가 없었으나, 최대값은 70 μ m깊이에서 -740MPa, 100 μ m깊이에서 -830MPa으로 이루어져 1단과 2단 쇼트피이닝 처리조건을 비교하면 극표면부의 압축 잔류응력의 변화는 없으며, 잔류응력 최대값은 -80 ~ -110MPa로 증가되었다. 또한 압축잔류응력 최대값 형성 깊이도 20 ~ 30 μ m으로 더 깊어져 압축잔류응력층을 넓게 증가시킴을 알수 있으며, Fig. 5, 6을 합쳐 비교한 것은 Fig. 7에 나타내었다.

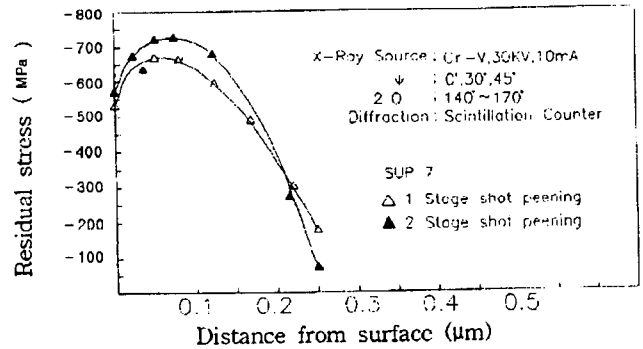


Fig. 5 Residual stress distributions by Shot-peening

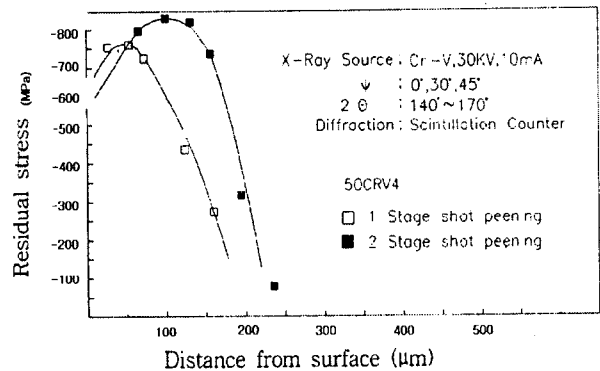


Fig. 6 Residual stress distributions by Shot-peening

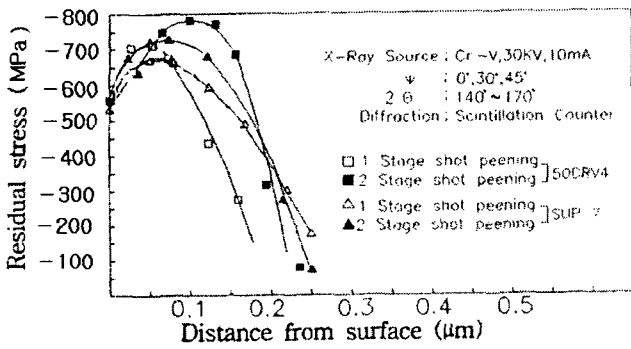


Fig. 7 Residual stress distributions by shot-peening

3.2 1단및2단 쇼트피이닝과 경도 분포

Fig. 8, 9는 SUP7, 50CrV4 강의 1단 및 2단 쇼트피이닝 후 깊이별 경도 분포를 나타내었다. 경도조사를 위해 시험편 단면을 열경화성 수지에 고정하고, 다이아몬드 페이스트(3μm)로 폴리싱 하였으며, 경도 조사는 마이크로 비커스 경도계를 이용하여, 극표면부에서 20μm깊이까지를 측정하중 25g을 적용하였고, 20μm에서 150μm깊이까지는 300g을 적용하였다.

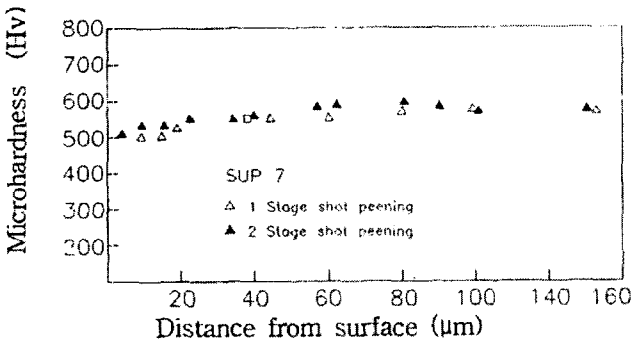


Fig. 8 Hardness distributions by shot peening(SUP7)

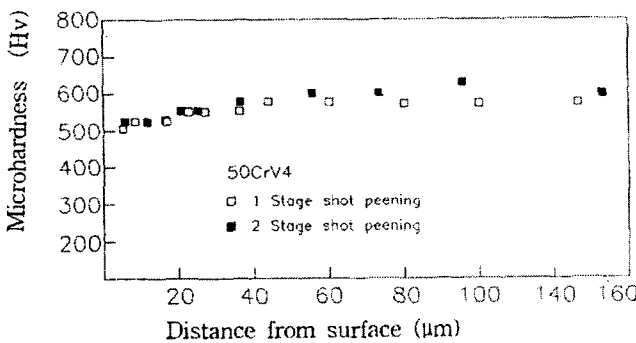


Fig. 9 Hardness distributions by Shot peening(50CrV4)

1단과 2단 쇼트피이닝 처리조건에서의 경도값 변화를 압축잔류 응력의 최대값 형성 깊이에서 비교하면 SUP7강종에서 1단 쇼트피이닝이 80μm깊이에서 Hv=560이고, 2단 쇼트피이닝이 82μm깊이에서 Hv=600으로 경도변화가 Hv=40정도 증가되었고, 50CrV4강종에서 1단 쇼트피이닝이 80μm깊이에서 Hv=586이고,

2단 쇼트피이닝이 100μm깊이에서 Hv=637로 조사되어 Hv=50정도의 경도값이 증가되었음을 알 수 있다

3.3 쇼트피이닝재의 S-N 곡선 영향

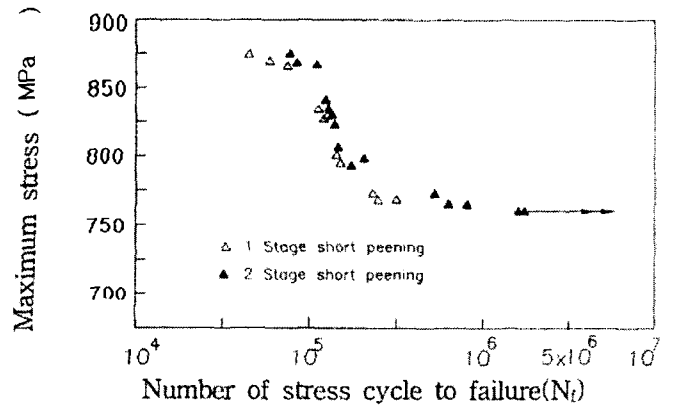


Fig. 10 S-N curves for SUP7 specimen with 1, 2 stage shot peening

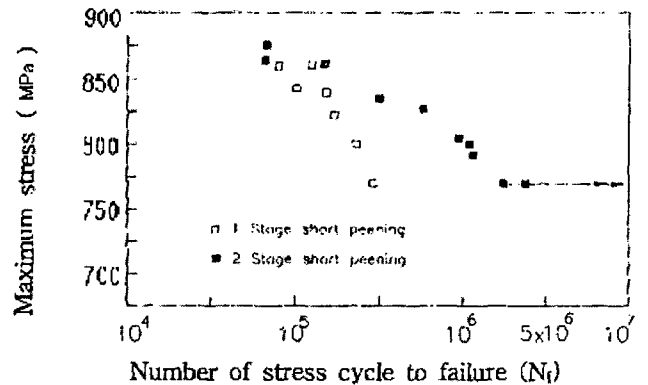


Fig. 11 S-N curves for 50CrV4 specimen with 1, 2 stage shot peening

1단및 2단 쇼트 피이닝 처리된 시험편에 대한 피로수명을 조사하였다. 이때 피로강도는 최소770 MPa, 최대875 MPa 적용하였으며(金鎭吉,1981) Fig. 10, 11 및 Fig. 12는 SUP7, 50CrV4 강종에 대한 회전 굽힘 S-N 선도다. 그리고 실험은 피로 반복회수를 $1 \times 10^3 \sim 1 \times 10^7$ 사이클의 범위에서 실행하였다. 반복피로 시험 결과 1단 쇼트피이닝 처리된 SUP7, 50CrV4 강종에 대한 피로수명을 최대응력 875 MPa에서 6만사이클, 8만사이클에 파단되었으며, 최소 응력 770 MPa에서는 65만사이클, 46만사이클에 파단 되었다. 2단 쇼트피이닝 처리된 SUP7, 50CrV4강종에 대한 피로수명은 최대응력 875 MPa에서 10만사이클, 8만사이클에서 파단 되었고, 최소 응력 770 MPa에서는 250만사이클, 320만사이클에서 미절손되어 1단 쇼트피이닝 처리보다 2단 쇼트피이닝 처리된 시험편의 피로수명은 5.7~7.0배 향상 되었다 (SAE. Manual,808)

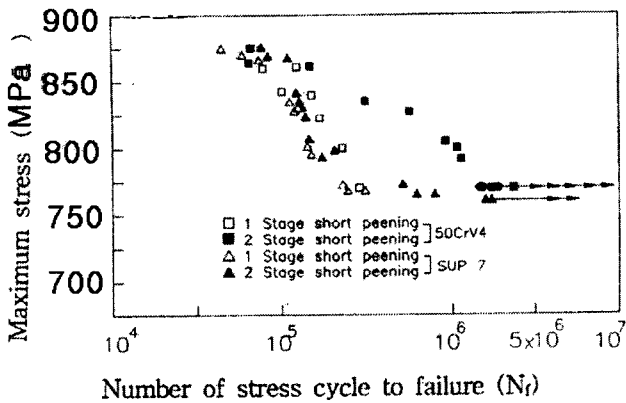


Fig. 12 S-N curves for SUP7, 50CrV4 specimen

3.4 피로 파단면의 고찰

피로시험 진행중 파단된 시험편 중 1단 쇼트 피이닝 조건과 2단 쇼트 피이닝 조건의 S-N 선도(Fig. 10)상 정상 피로회수를 나타내는 시험편을 샘플링하여 파단면의 비금속 개재물은 EDS(Energy dispersive Spectrometer, KEVEX INSTRUMENT, SIGMA-3) AL에 의한 것이며, 또 파단면의 SEM (HITACHI 사 S-2150) 으로 관찰하였다.

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

관찰된 사진을 고찰해 보면, 1 단 및 2 단 쇼트 피이닝 처리 파단 현상이 표면을 기점으로 하여 내부로 진행되는 정상적인 피로파단면을 나타내고 있으나, Fig. 19, 20에서는 2단 쇼트 피이닝된 SUP7, 50CrV4 강종 모두 표면으로부터 0.5mm, 0.8mm 깊이에 42 μ m, 22 μ m 크기의 비금속 개재물이 관찰되었다. 이 시험편은 2단 쇼트피이닝된 시험편으로서 피로파단을 응력 800MPa, 830MPa 상태에서 24만사이클, 77,600사이클에서 조기 파단되었다. 이 현상을 고찰해 보면 응력 800MPa이하에서는 1 단 쇼트피이닝보다 2단 쇼트피이닝이 피로강도를 3.5 ~ 7배 향상시키지만, 2단 쇼트피이닝을 하여도 응력 800MPa이상에서는 금속 내부에 존재하는 비금속 개재물에 의하여 조기 파단 되는 것으로 사료된다. 이와같이 응력 800MPa이하에서는 금속표면의 압축잔류응력 증가는 피로 균열 전파 억제에 기여하고 있지만, 고응력하에서는 금속의 표면보다는 금속내부에 존재하는 비금속 개재물의 영향이 크다고 볼수 있으며, 이 비금속 개재물에 대한 영향평가는 여러 학자에 의해 보고 되어지고 있다(W.E.Dudsworth). 위에서 관찰된 파단면의 비금속 개재물은 EDS(Energy Dispersive Spectrometer, KEVEX INSTRUMENT, SIGMA-3)로 분석한 결과 산화알루미늄(Al_2O_3)으로 판명되었으며, 그 결과는 Fig. 13, 14에서 보여주고 있다. 이 Al은 강을 길드 강으로 제작할 때 투입되는 Al한 것이다.

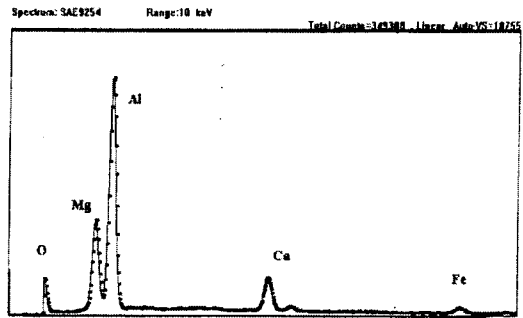


Fig. 13 EDS Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface (SUP7)

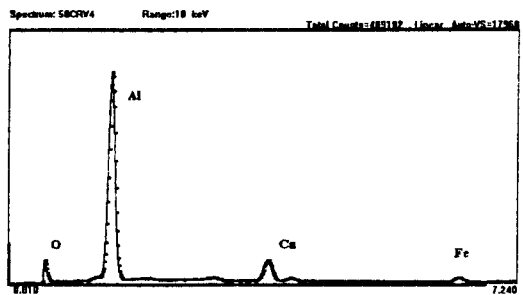


Fig. 14 EDS Spectrometer pattern of nonmetal in fracture surface

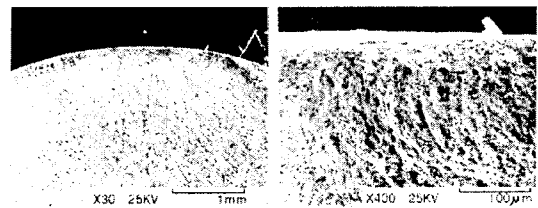


Fig. 15 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP7 under 1 stage shot-peened

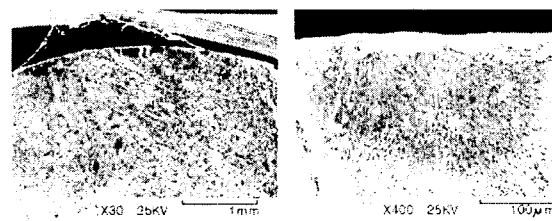


Fig. 16 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen SUP7 under 2 stage shot-peened

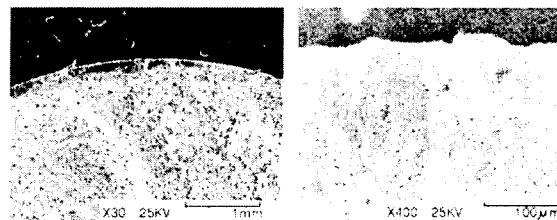


Fig. 17 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 1 stage shot-peened

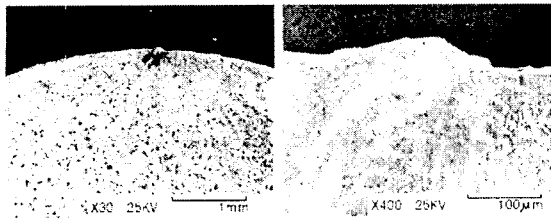


Fig. 18 SEM photographs of fracture surface around crack initiation point for specimen 50CrV4 under 2 stage shot-peened

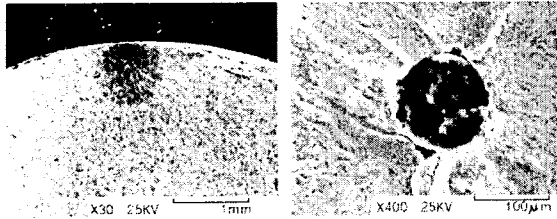


Fig. 19 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under 800MPa

specimen : SUP7
 Condition : 2 stage Shot-Peening
 Fatigue Limit : 800MPa
 Number of Cycles:240,000

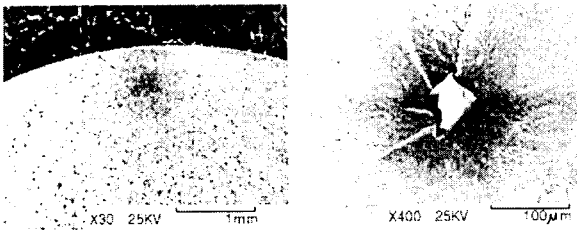


Fig. 20 SEM photographs of fish eye (nonmetal) fracture region under 830MPa

Specimen : 50CrV4
 Condition : 2 stage Shot-Peening
 Fatigue Limit :830MPa
 Number of Cycles : 77,600

4. 결 론

SUP7 및 50CrV4를 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 80~110MPa 향상되었으며, 압축잔류응력의 깊이도 20~30µm깊어져 압축잔류응력 형성층이 넓게 증가하였다.

- 회전 굽힘응력 $\pm 800\text{MPa}$ 이하에서는 2단 쇼트피이닝 처리가 1단 쇼트피이닝 처리보다 5.7 ~ 7.0배의 피로수명이 증가되었다.
- 2단 쇼트피이닝을 하여 회전굽힘응력 $\pm 800\text{MPa}$ 이하에서 피로강도가 향상되었으나, 회전굽힘응력 $\pm 800\text{MPa}$ 이상에서는 금속 내부에 존재하는 비금속 재재물의 영향을 받아 조기 파단되었다.
- 2단 쇼트피이닝을 실시하여도 압축잔류응력 깊이별 경도 증가는 $Hv=50$ 으로서 크게 증가되지 않았다.
- 표면조도는 2단 쇼트피이닝이 1단 쇼트피이닝에 비하여 평균조도값 28%향상 최대값은 30%향상되었으며, 이것은 표면 조도상태에 따라 노치 효과를 줄여 피로수명 향상에 기여하는 것으로 사료된다.

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
 横堀武王(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
 서창민. 오명석(1997). "TiN 코팅 공정 개선에 의한 1Cr-1Mo-0.25V 강재의 피로 강도 특성에 관한 연구", 한국 해양공학회지 논문집, 제11권 제4호, PP.53~64
 W.E.Dudswdrth:Metallugia,69,412(1964)P53h.n.Cummings:
 WADC Tech.Rep.,PB161144.(1959) PP 59
 SAE Manual: SAE Manual on shot-peening. SAE J 808a
 H.J.Plaster:Blast Cleaning and allied processes,
 A.M.I. CORR.T.M.INST.M.,Volume II, pp 12~30
 H.O. Fuchs. editor: Proceedings of the second in-ternationference on shot-peening,ICSP-2 (1984) PP316-333