

현가장치재의 피로수명향상 공법개발에 관한 연구

박경동^{*1)} · 정찬기²⁾

부경대학교 기계공학부¹⁾ · 대원강업²⁾

A Study of Development Methods of Fatigue Life Improvement for the Suspension Material

Kyoungdong Park^{*1)} · Changi Jung²⁾

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Bukyoung University, Busan 608-739, Korea

²⁾Daewonkangup, Ungnam-dong, Changwon 641-290, Korea

(Received 10 June 2003 / Accepted 9 October 2003)

Abstract : The development of new materials with light weight and high strength has become vital to the machinery, aircraft and auto industries. However, there are a lot of problems with developing such materials that require expensive tools, and a great deal of time and effort. Therefore, the improvement of fatigue strength and fatigue life are mainly focused on adopting residual stress(in this thesis). The compressive residual stress was imposed on the surface according to each shot velocity(57, 70, 83, 96 m/sec) based on Shot-peening, which is the method of improving fatigue life and strength.

By using the methods mentioned above, the following conclusions have been drawn.

1. The fatigue crack growth rate(da/dN) of the Shot-peened material was lower than that of the Un-peened material. And in stage I, ΔK_{th} , the threshold stress intensity factor, of the shot-peen processed material is high in critical parts unlike the Un-peened material. Also m , fatigue crack growth exponent and number of cycle of the Shot-peened material was higher than that of the Un-peened material. That is concluded from effect of da/dN .
2. Fatigue life shows more improvement in the Shot-peened material than in the Un-peened material. And compressive residual stress of surface on the Shot-peen processed operate resistance force of fatigue crack propagation.

Key words : Shot peening(쇼트 피닝), Compressive residual stress(압축잔류응력), Fatigue crack growth rate(피로균열진전속도), Shot velocity(투사속도), Fatigue life(피로 수명), Threshold stress intensity factor(하한계 응력확대계수), Fatigue crack growth exponent(피로균열진전지수)

1. 서론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차 등에 필요한 철강 소재 분야에서 활발히 연구되고 있다.¹⁾

기계재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 결정적인 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 항공기, 기계, 선박, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과 재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있지만 많은 비용과 시간, 노력을 필요로 한다는 문제점을 갖고 있다. 특히, 기계류의 피로수명의 연장방법으로는 피로손

*To whom correspondence should be addressed.
parkkd@pknu.ac.kr

상보수, 잔류응력의 부여, 휴식기간의 부여 등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이다. 쇼트피닝은 1927년 Herber, E. G.가 높은 곳에서 강관에 작은 강구를 낙하시켜 금속표면의 경화등을 시험한 것을 시초로 1940년에 Zimmerli, F. P.는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 향상된다는 것을 실증하여 미국의 자동차와 항공부품업체에서 지속적으로 연구하고 실용화함으로써 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다.²⁾ 이러한 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면에서의 인장력과 상쇄되어 표면에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜 주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다.^{3,4)}

한편, 임계영역에서의 피로균열성장거동은 피로균열성장속도, 미세구조, 실험 분위기 및 하중조건 등의 내적, 외적 인자에 의해 크게 좌우되며 실험이 Paris 영역, $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식이 성립하는 영역에서 주로 행해지는 반면에 ΔK 가 감소하는 영역에 들어가면 피로균열성장속도가 급격히 감소하여 ΔK_{th} 이하(임계영역)에서는 피로균열이 성장하지 않는다.^{5,6)} 그러나 아직 쇼트볼 투사속도에 의한 피로강도 향상과 최적조건을 연구한 것을 찾아보기 힘들어 본 논문에선 실험에 적용하기 어려운 차량용 현가장치 및 스프링재료로 사용되고 있는 SUP-9강에 대해 고강도의 재료개발공법을 개발하기 위해 쇼트피닝가공속도를 57m/sec, 70m/sec, 83m/sec, 96m/sec의 4단계로 구분하여 압축잔류응력의 크기와 피로강도에 미치는 영향을 언피닝재와 비교하여 피로강도 향상과 피로수명 향상에 대한 연구를 하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이

재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고 Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시험편의 기계적 성질이다.

피로균열 진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께를 13mm로 하였고 시험편의 채취는 열간압연된 프렛마 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 각부 치수는 ASTM E647-93의기준에 따른 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어커팅 방전가공기에서 노치 끝부분이 60의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.⁷⁾

Table 1 Chemical composition of specimen(wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr
0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (MPa)	Hardness(HrC)		Yield strength (MPa)	Elongation (%)
	After quenching	After tempering		
1226	55	47	1079	9

실제로 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장시험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(LEFM)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소시키고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다.⁸⁾

2.2 압축잔류응력의 부여

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편의 쇼트피닝 가공면에 균일한 압축잔류응력을 부여하기 위해 치구에 고정하여 고속회전 터빈방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건 하에서 압축잔류응력의 크기가 각각 차이가 있는 4종류(57m/sec, 70m/sec, 83m/sec, 96m/sec)의 시험편을 제작하였다.

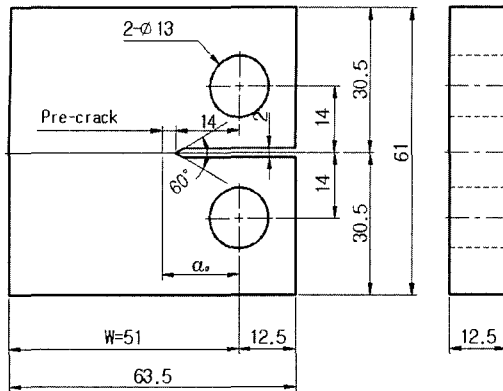


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

Table 3 Condition of shot-peening

Content	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
Impeller diameter (mm)	490	490	490	490
Shot velocity (m/sec)	57	70	83	96
Shot Ball diameter (mm)	0.8	0.8	0.8	0.8
Arc-height (mm)	0.32	0.39	0.42	0.46
Time(Sec.)	24	24	24	24
Coverage(%)	85	85	85	85

2.3 실험방법

2.3.1 압축잔류응력의 측정

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기 (Rigaku - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20µm 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.⁹⁾

2.3.2 피로균열진전 실험

피로진전실험은 전기유압서보 피로시험기에 의해 응력비 R=0.3, 주파수는 10Hz, 피로균열 길이측정은 크립게이지에 의해 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-ray diffraction	Condition	
X-ray source	490	490
	70	83
	0.8	0.8
∅	0° 15° 30° 45°	
24	140° ~ 170°	
85	Scintillation counter	

시험은 ASTM E647-93에 의거 ΔK 감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK의 계산식은 다음과 같다.

여기서, α는 하중중심에서의 균열길이, W는 하중중심에서의 시험편길이, B는 시험편의 두께이며 ΔP는 하중변위이다.^{10,12)}

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B\sqrt{W}} \frac{(2+\alpha)}{(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.46\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (1)$$

단, α = a/W (a/W ≥ 0.2)

실험해석을 위해 응력확대계수범위 ΔK는 다음과 같으며

$$\Delta K = \begin{cases} K_{max} - K_{min} & (K_{min} > 0) \\ K_{max} & (K_{min} \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

및 응력비 R은

$$R = K_{min} / K_{max} \quad (3)$$

의 형태가 되며, 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 그것을 Paris 법칙인

$$da/dN = C(\Delta K)^m \quad (4)$$

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변화하며 ΔK의 기울기는

$$C_g = \frac{1}{\Delta K} \cdot \frac{d\Delta K}{da} \geq 0.08 \text{ mm}^{-1} \quad (5)$$

da/dN의 측정범위는 Δa ≤ 0.5mm이다.

여기서 C와 m은 각각 재료상수, 피로균열진전지수로서 이것으로 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 된다.¹³⁾

3. 실험결과 및 고찰

3.1 쇼트볼과 쇼트피닝가공형상

쇼트피닝가공 품질에 있어 쇼트볼은 매우 중요한 역할을 한다. 쇼트피닝기계, 투사각도 등을 잘 맞추고 쇼트볼자체가 적합하고 쇼트볼의 품질과 크기가 균질해야하며 공작물보다 높은 경도를 가지면서 쇼트볼의 수명이 길고 파쇄되는 양이 적은것이 좋다.

Fig. 2는 시험편 표면에 투사한 쇼트볼의 형상을 나타내었다. 이 형상들은 모두 적합한 쇼트볼의 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림과 같이 쇼트볼은 반드시 일정한 크기를 가져야 하고, 필수적으로 날카로운 모서리 또는 깨어진 조각이 없는 구형이어야 한다.

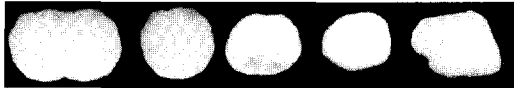


Fig. 2 Peening media

3.2 쇼트볼투사속도와 압축잔류응력의 관계

시험편의 표면에 형성된 압축잔류응력을 쇼트볼투사속도별로 X-선 잔류응력측정장치를 이용하여 표면으로부터 10~20 μ m 깊이로 전해연마한 후 측정 한 결과를 Fig. 3에 나타내었다. Fig. 3의 쇼트볼투사속도별 압축잔류응력의 최대치와 그 형성깊이를 Table 5에 나타내었다.

Fig. 3과 Table 5에서 투사속도 70m/sec에서 최대 압축잔류응력이 형성되었고 깊이는 투사속도 96m/sec에서 최대를 나타냈다. Fig. 4에 투사속도별 압축잔류응력의 최대치와 최소치를 비교하였다.

Table 5 The Maximum of residual stress and depth

Shot velocity	Maximum of residual stress	Depth
57m/sec	705MPa	120 μ m
70m/sec	735MPa	150 μ m
83m/sec	730MPa	180 μ m
96m/sec	726MPa	200 μ m

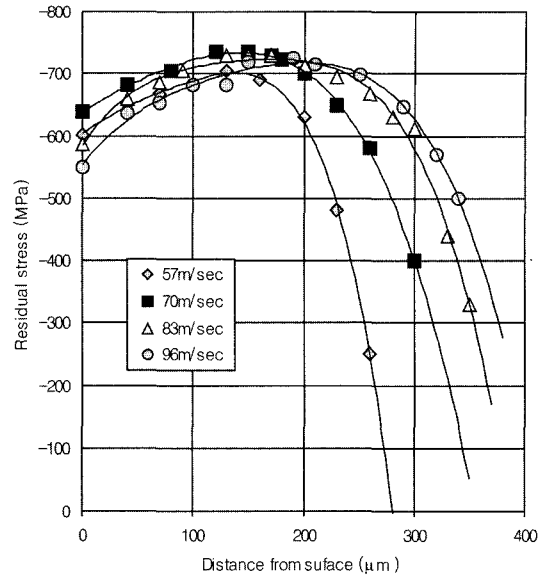


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot peening

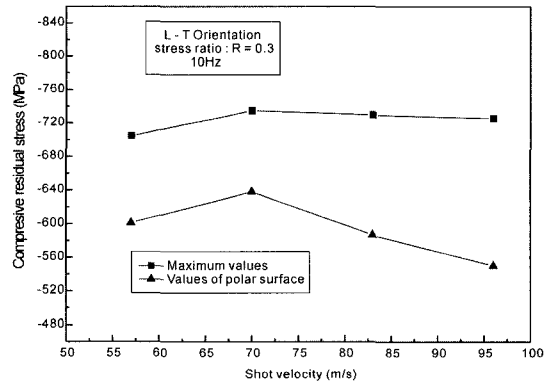


Fig. 4 Relation between compressive residual stress(MPa) and shot velocities(m/s)

3.3 쇼트피닝재와 언피닝재의 경도

쇼트볼투사속도 70m/sec에서 쇼트피닝재와 언피닝재의 단면에 대한 경도분포를 비교하였다. 압축잔류응력이 형성된 쇼트피닝재의 경도를 측정 한 결과 Hv455~465를 나타냈고 언피닝재의 경우 Hv450~453으로 나타나 쇼트피닝재가 약간 경도가 높았으나 큰 차이는 없었다. Fig. 5에 경도값을 나타내었다.

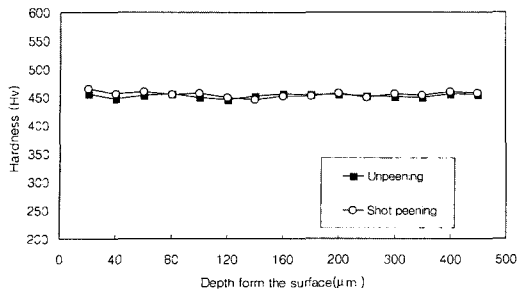
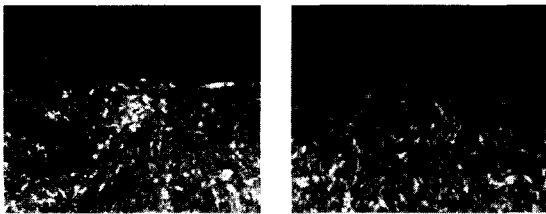


Fig. 5 Hardness distribution of specimen

3.4 쇼트피닝재와 언피닝재의 조직

언피닝재와 쇼트피닝재의 현미경조직을 Fig. 6에 나타내었다.



Un-peened(a) Shot-peening (b)

Fig. 6 Microstructures of specimen (X400)

Fig. 6의 (a)언피닝재의 경우 표면에서 200 μm 까지 조직의 조밀함이 나타나지 않았으나 (b)의 쇼트피닝재의 경우 150~200 μm 까지 조밀하게 나타내고 국부적인 소성변형을 일으킨 현상이 관찰되었다.

3.5 쇼트볼 투사속도와 피로크랙전파 특성

Fig. 7에 쇼트피닝재의 쇼트볼투사속도별 피로균열진전특성을 언피닝재와 비교하여 나타내었다. 언피닝의 경우 $da/dN=8.938 \times 10^{-6}$ 이고 쇼트피닝의 경우(70m/s)는 $da/dN=4.117 \times 10^{-6}$ 으로 약 1.8배의 피로균열진전속도 억제 효과가 있었다.

3.6 하한계 특성

Fig. 8은 언피닝과 쇼트볼 투사속도별 하한계응력확대계수와와의 관계를 도시하였다. 하한계응력확대계수 ΔK_{th} 는 언피닝에서 $4.75\text{MPa}\sqrt{m}$, 쇼트볼 투사속도 57m/sec에서 $7.41\text{MPa}\sqrt{m}$, 70m/sec에서 $8.06\text{MPa}\sqrt{m}$, 83m/sec에서 $7.81\text{MPa}\sqrt{m}$, 96m/sec에서는

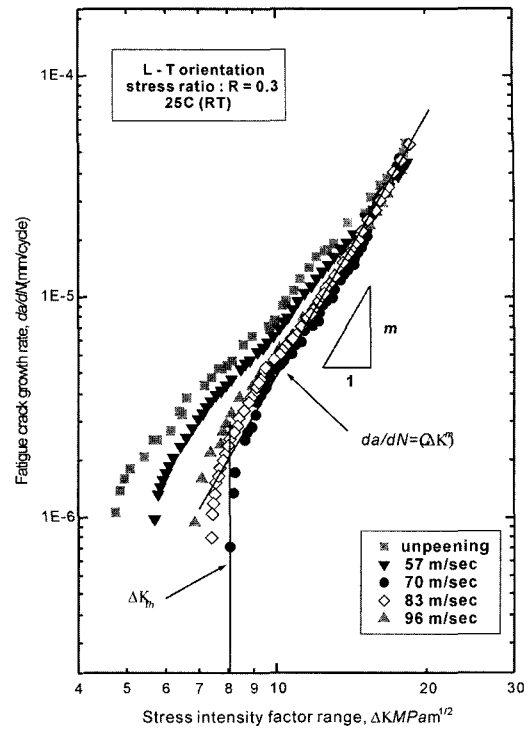


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

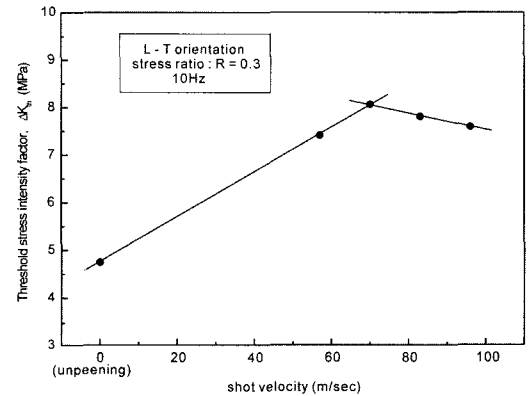


Fig. 8 Relation between threshold stress intensity factor range and shot velocity

$7.59\text{MPa}\sqrt{m}$ 로써 쇼트볼 투사속도가 가속될수록 증가되는 경향을 보여주고 있으나 투사속도 70m/sec를 변곡점으로하여 그 이상의 투사속도에서는 점차적인 감소현상이 관찰되었다. 이는 오버피닝에 의한 시험편 표면부에 과도한 에너지가 발생하여 극표면 압축잔류응력이 감소되는 현상으로 판

단되었다.

이와같이 쇼트피닝가공에 의한 시험편 표면부의 압축잔류응력은 초기균열진전뿐만 아니라 피로균열진전과정에서 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 피로균열진전이 정지될때까지도 작용되므로써, 압축잔류응력이 증가할수록 하한 계응력확대계수 ΔK_{th} 가 높게 형성되었음을 판단할 수 있다.

3.7 재료상수와 피로균열진전지수와의 관계

Fig. 9, 10에는 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C 와의 관계를 나타낸 것

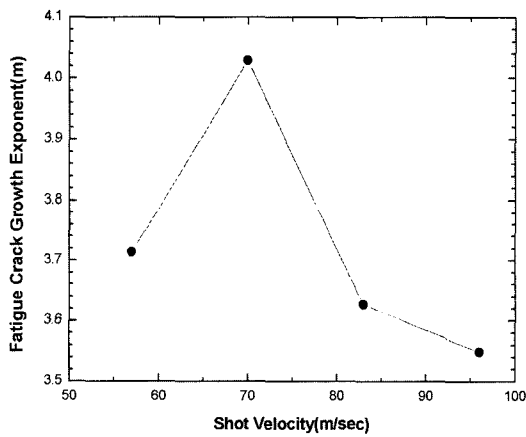


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth exponent m and shot velocity

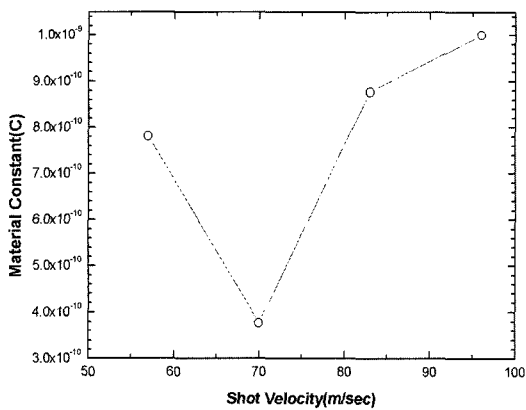


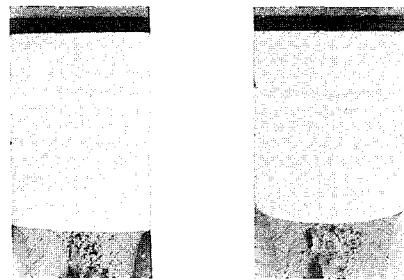
Fig. 10 Relation between material constant C and shot velocity

으로 m 은 투사속도 57m/sec에서 70m/sec까지 증가하다가 70m/sec 이후에서는 급격히 떨어지다가 다시 96m/sec까지는 완만히 감소하였으며 C 와 m 은 서로 반대의 경향으로 나타났다.

3.8 파단면의 특성

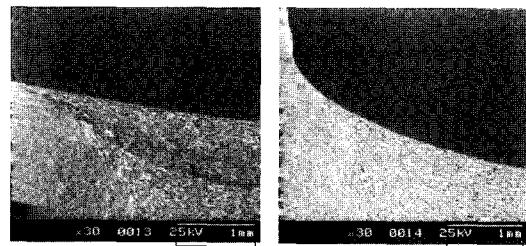
Fig. 11은 피로크랙진전 파면의 실물사진이며 Fig. 12는 Un-peened(a)와 쇼트피닝(70m/sec)된 shot-peened (b) 시험편의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.

이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 극부표면에 형성된 압축잔류응력에 의해 외부에서 인장압축력이 반복적으로 작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 피로균열진전기구에 작용하여 피로균열진전속도 da/dN 이 지연되고 있는 것으로 사료된다.



Un-peened (a) Shot-peening (b)

Fig. 11 Photographs of fracture surface



Un-peened (a) Shot-peening (b)

Fig. 12 SEM photographs of fracture surface

4. 결론

쇼트피닝 가공에 의해 압축잔류응력이 형성된 현

가장치용 스프링강(JISG SUP-9)에 대하여 응력비 R=0.3, 사이클 10Hz로 상온에서 쇼트피닝 가공속도를 57m/sec, 70m/sec, 83m/sec, 96m/sec로 피로크랙 전파시험을 실시하여 피로크랙전파속도, 크랙전파 특성 및 하한계 응력확대계수를 측정 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 쇼트피닝재의 경우 피로균열 전파속도 da/dN 과의 양대수 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 쇼트피닝 가공의 투사속도에 따라 da/dN 의 관계가 변화가 있음을 알 수 있었다.
- 2) $da/dN-\Delta K$ 와의 관계에서 언피닝재의 경우는 2.5×10^{-6} mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(70m/sec)의 경우가 4.333×10^{-6} mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다.
- 3) 크랙길이 a 와 사이클수 N 과의 관계에서 언피닝재 보다 70m/sec의 경우는 약 2배, 96m/sec의 경우는 약 1.6배의 피로수명향상의 효과를 나타내었다.
- 4) 쇼트피닝 가공에 의해 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 피로균열진전 억지력으로 작용한 것으로 나타났으며 투사속도 70m/sec의 경우가 가장 높고 투사속도 57m/sec, 83m/sec, 96m/sec 순서로 나타났다. 투사속도가 70m/sec 보다 가속할수록 압축잔류응력과 피로수명이 감소하여 70m/sec가 최적 속도임을 알았다.

References

- 1) O. Murakami, A Guide of Fracture Mechanics, O-Mu Company, pp.121-127, 1979.
- 2) S. G. Jung, S. H. Lee, A Guide of Shot peening Processing, SeHwa Pub. pp.6-12, 2001.
- 3) R. D. Gillespie, "Its Effect on Process Consistency and Resultant Improvement in Fatigue

- Characteristics," Proc. of the 5th International Conference on Shot Peening, Vol.1, Oxford, pp.81-91, 1993.
- 4) H. Wohlfahrt, "The Influence of Peening Conditions on the Resulting Distribution of Residual Stress," Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening, Vol.1, Chicago, pp.316-331, 1984.
- 5) K. D. Park, M. G. Son, "A Study on the Shot Peening on the High Temperature Fatigue Crack Propagation," Busan Branch of KSME, pp.30-34, 2002.
- 6) K. D. Park, C. U. Ryu, "A Evaluation on the Fatigue Crack Propagation Characteristics for spring Steel at Low Temperature," Busan Branch of KSME, pp.49-56, 2002.
- 7) ASTM, E1426, 1998.
- 8) ASTM, E647-81, 1981.
- 9) K. D. Park, S. O. Park, "A Study on the Fatigue Crack Propagation Characteristic for SUP9 Steel at Low Temperature," KCORE, Vol.1, No.5, pp.80-87, 2002.
- 10) K. D. Park, C. G. Jung, "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of JISG 4081SUP7-DIN50CrV4 Steel," KCORE, Vol.15, No.4, pp.66-72, 2001.
- 11) Y. B. Lee, H. K. Kim, J. S. Jung, Fundamentals of Fatigue Analysis, Chungmungak Pub., pp.99-125, 1999.
- 12) K. D. Park, C. G. Jung, "Effect of Compressive Residual Stress on the High Temperature Fatigue Crack Propagation Behavior of Spring Steel," KCORE, Vol.1, No.5, pp.73-79, 2002.
- 13) C. M. Verpoort, C. Gerdes, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades, Shot Peening Theory and Application," Institute for Industrial Technology Transfer International, Vol.1, France, pp.11-70, 1989.