

해양구조용강의 피로거동에 관한 연구

박경동* · 하경준**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 기계공학부 대학원

A Study on Shot peening on Fatigue Crack Growth Property for Marine Structural Steel

KYOUNG-DONG PARK*, KYOUNG-JUN HA**

*Pukyong National University DEPT. of Mechanical Engineering, Busan 608-739, Korea

**Pukyong National University DEPT. of Mechanical Engineering, Busan 608-739, Korea

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

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 by 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, I arrived at the following conclusions

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.

1. 서 론

기술산업에서 요구되는 부품의 경량화는 소비자로부터 요구되는 필수적인 사항으로서, 기계장치, 항공기, 선박, 철도차량, 자동차 등에 필요한 철강(금속)소재 분야에서 활발히 연구되어지고 있다.(Murakami and Ominami, 1979)

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

해양재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 기계, 항공기, 선박, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과

재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있지만 많은 비용과 시간, 노력을 필요로 한다는 문제점들을 갖고 있다.

특히, 해양구조물 피로수명의 연장방법으로는 피로손상보수, 잔류응력의 부여(ASTM, 1998), 휴식기간의 부여등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 1927년 Herber, E. G.가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 금속표면의 경화등을 시험한 것을 시초로 1935년에 Weibel이 엔진밸브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년에 Zimmerli, F. P.는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증하여 미국의 자동차와 항공부품업계에서 지속적으로 연구하고 실용화함으로써 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다(정성균 등, 2001).

이러한 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되

제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당동 산100

051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다(Gillespie, 1993; Wohlfahrt, 1984; 박경동과 손명균, 2002; 박경동과 류찬욱, 2002; 박경동과 정찬기, 2001).

한편, 임계영역에서의 피로균열성장거동은 피로균열성장속도, 미세구조, 실험 분위기 및 하중조건 등의 내적, 외적 인자에 의해 크게 좌우되며 실험이 Paris영역, $da/dN = C(\Delta K)^m$ 의 식이 성립하는 영역, 에서 주로 행해지는 반면에 ΔK 가 감소하여 영역 I(John and Stanley, 1999)에 들어가면 피로균열성장속도가 급격히 감소하여 ΔK_{th} 이하(임계영역)에서는 피로균열이 성장하지 않는다.

본 논문에선 실험에 적용하기 어려운 해양구조물, 선박용 스프링재료로 사용되고 있는 SUP-9강에 대해 고강도의 재료개발 공법을 개발하기위해 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 해양구조물, 선박용 및 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 이 재료의 화학적 성분은 Table 1과 같고, Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시편의 기계적 성질이다.

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

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

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장시험의 기본역학인 선형탄성과 파괴역학(LFEM)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성

장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 첨단모양 및 하중 이력으로 인한 영향을 감소시키고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25℃ 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다(이용복 등, 1999; Kobayasi, H., 1993).

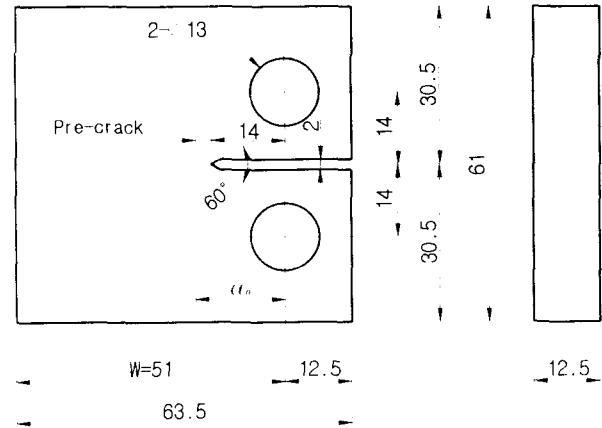


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

2.2 압축잔류응력의 부여

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

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	
Coverage (%)			85	

2.3 실험방법

2.3.1 압축잔류응력의 측정

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(Rigaku - MSF2M)를 사용

하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μm 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
X-Ray Source	Target	Cr-V
	Voltage	30KV
	Current	10mA
θ	0°, 15°, 30°, 45°	
2 θ	140°~170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

2.3.2 피로균열진전 실험

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

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

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

여기서, a 는 하중중심에서의 균열길이, W 는 하중중심에서의 시험편길이, B 는 시험편의 두께이며 ΔP 는 하중변위이다.

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

$$\alpha = a/W \quad (a/W \geq 0.2)$$

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK

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

및 응력비

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

의 함수가 되며, 여기서 R 의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 그것을 Paris 법칙(ASM E647-81, 1981; Kobayasi H., 1993; Japan mechanic institute standard, 1981)인

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

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변하며 ΔK 의 기울기는

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

da/dN 의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ 이다.

여기서 C 와 m 은 각각 재료상수, 피로균열진전지수로서 이것으로 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 된다(박경동과 박상오, 2002; 정찬기와 박경동, 2002).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 쇼트볼과 쇼트피닝가공형상

쇼트피닝가공 품질에 있어서 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 적은 것이 좋다.

Fig. 2은 시험편 표면에 투사한 쇼트볼의 형상을 나타내었다. 이 형상들은 모두 적합한 쇼트볼의 형상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 쇼트볼은 질량, 경도, 투사속도, 재질 등을 고려하는 것이 바람직하다.

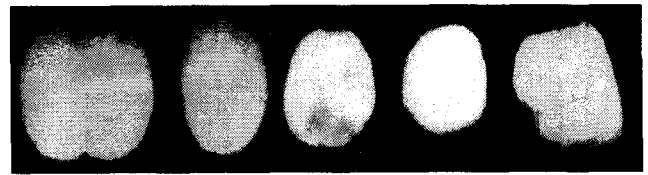


Fig. 2 Peening media

3.2 쇼트볼투사속도와 압축잔류응력의 관계

시험편의 표면에 형성된 압축잔류응력을 쇼트볼 투사속도별로 X선 잔류응력측정장치를 이용하여 표면으로부터 10~20 μm 깊이로 전해연마한 후 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

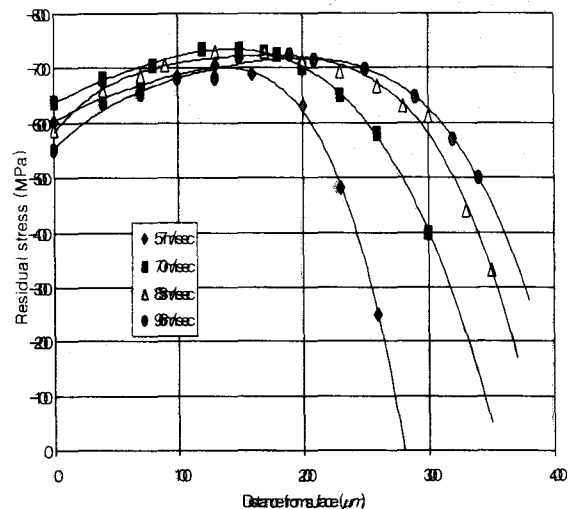


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot peening

Fig. 3의 쇼트볼투사속도별 압축잔류응력의 최대치와 그 형성깊이를 Table 5에 나타내었다.

Table 5 The Maximum of residual stress and depth

쇼트볼투사속도	압축잔류응력의 최대치	깊이
57m/sec	705MPa	120 μ m
70m/sec	735MPa	150 μ m
83m/sec	730MPa	180 μ m
96m/sec	726MPa	200 μ m

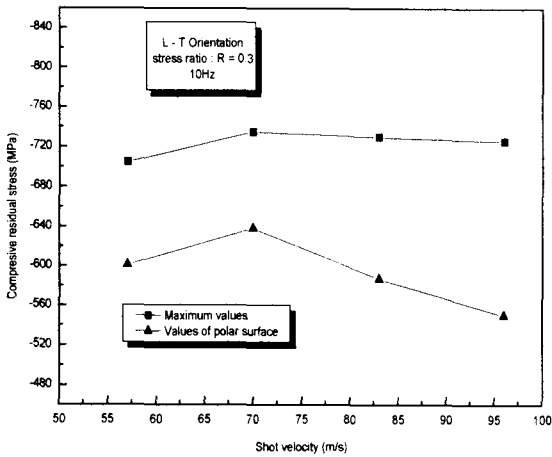


Fig. 4 Relation between compressive residual stress (MPa) and shot velocities(m/s)

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

3.3 쇼트피닝재와 언피닝재의 경도

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

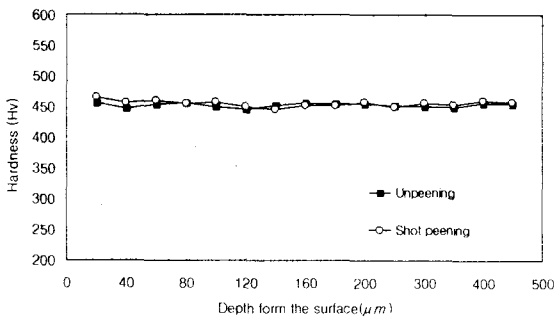
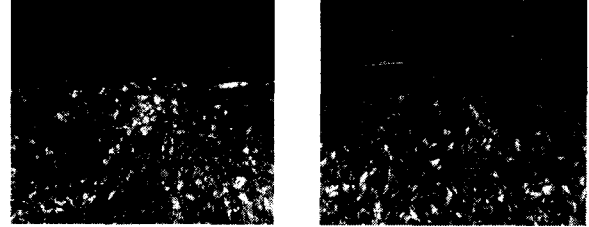


Fig. 5 Hardness distribution of specimen

3.4 쇼트피닝재와 언피닝재의 조직

언피닝재와 쇼트피닝 가공재의 현미경조직을 Fig. 6에 나타내었다.



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

Fig. 6 Microstructures of specimen (X400)

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

3.5 쇼트볼 투사속도와 피로크랙전파 특성

Fig. 7에 쇼트피닝재의 쇼트볼투사속도별 피로균열진전특성을 언피닝재와 비교하여 나타내었다. 그리고 Fig. 8에는 피로균열진전깊이와 하중작용횟수를 나타내었다.

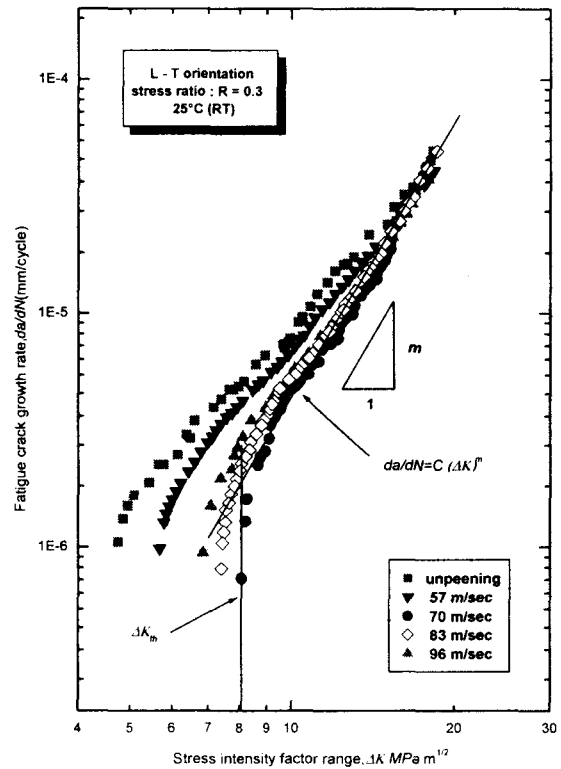


Fig. 7 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Fig. 7에서 언피닝재의 경우가 가장 낮은 하한계 특성을 나타내었고 쇼트볼투사속도 70m/sec의 경우 가장 높은 하한계 특성을 나타내었다.

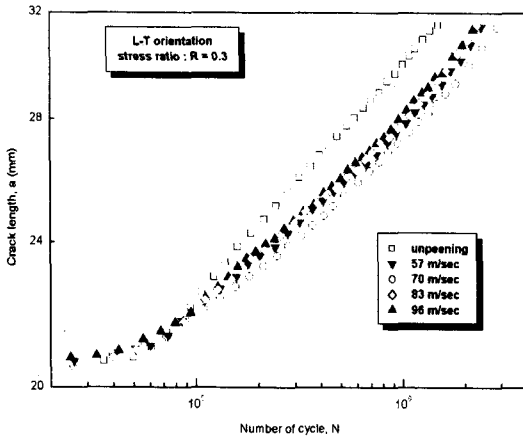


Fig. 8 Relation between crack length and number of cycle

그리고 70m/sec 이상에서는 하한계 특성이 감소되었다. 이는 오퍼피닝에 의한 재료표면부에 과도한 에너지가 발생하여 100MPa 정도 압축잔류응력이 감소함을 나타내었다. 이로 인해 피로균열진전속도 지연효과가 감소되는 것으로 판단되었다.

언피닝재에 비하여 쇼트피닝재의 경우 압축잔류응력이 표면의 균열진전을 억제해줌으로 균열진전 지연효과가 나타난 것으로 생각된다. Fig. 7에서 균열길이 $a=28\text{mm}$ 지점에서 하중반복횟수는 언피닝재의 경우 $N=619,824$ 회, 70m/sec 경우 $N=1,222,120$ 회로 약 2배의 피로수명이 향상되었으나 투사속도 70m/sec 이상은 수명이 감소하였다.

3.6 재료상수와 피로균열진전지수와의 관계

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

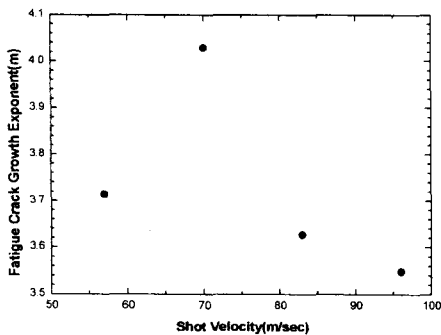


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth exponent m and shot velocity

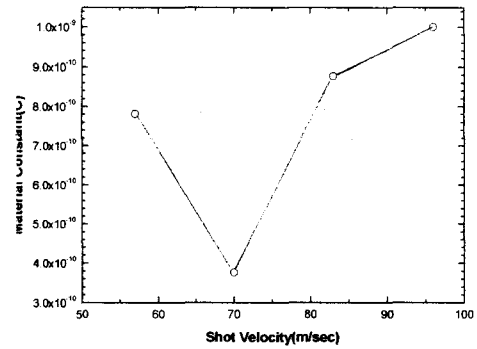
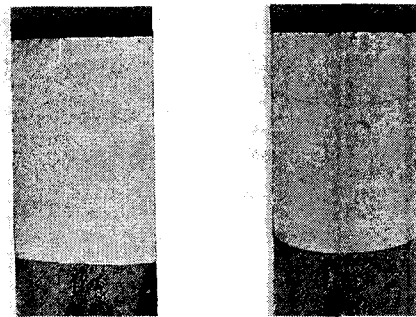


Fig. 10 Relation between material constant C and shot velocity

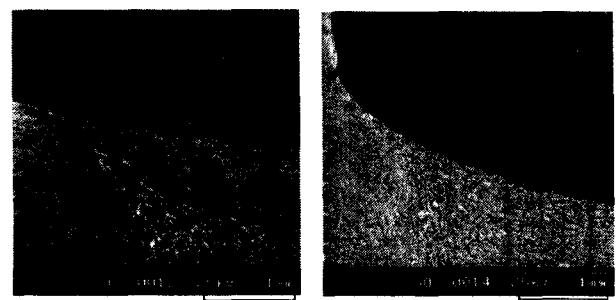
3.7 파단면의 특성

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



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

이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에서 극부표면에 형성된 압축잔류응력에 의해 외부에서 인장압축력이 반복적으로 작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형

에 대한 구속력으로 피로균열진전기구에 작용하여 피로균열진전속도 da/dN 이 지연되고 있다는 것으로 사료된다.

5. 결 론

쇼트피닝 가공에 의해 압축잔류응력이 형성된 스프링강(JISG SUP-9)에 대하여 응력비 $R=0.3$, 사이클 10Hz로 상온에서 피로 크랙전파시험을 실시하여 스프링강의 피로크랙전파속도, 크랙 전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 Shot-peened재의 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 Un-peened재의 경우는 $2.5 \times 10^6 \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(2200rpm)의 경우가 $4.333 \times 10^6 \text{mm/cycle}$ 까지 양대수 직선관계가 성립되었다.
- (3) 크랙길이 a 와 사이클수 N 과의 관계에서 Un-peened재 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 57, 83, 96m/sec 순서로 나타났다.

참 고 문 헌

박경동, 류찬욱 (2002). "스프링강의 저온피로크랙 전파특성에 관한 평가", 대한기계학회 부산지부 추계학술대회, pp 49~56

박경동, 박상오 (2002). "SUP9강의 저온피로크랙 전파특성에 관한 연구", 한국해양공학회지 제1권, 제5호, pp 80~87

박경동, 손명균 (2002). "쇼트피이닝 가공된 스프링강의 피로균열진전에 미치는 고온의 영향", 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회, pp 30~34

박경동, 정찬기 (2001). "JISG4081 SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피이닝의 영향", 한국해양공학회 논문집, 제15권, 제4호, pp 66~72

이용복, 김호경, 정진성 (1999). "피로해석의 기초", 청문각, pp 99~125.

정성균, 이승호 (2001). "쇼트피닝 가공개론", 세화출판사, pp 6~12.

정찬기, 박경동 (2002). "압축잔류응력이 스프링강의 고온환경 피로균열 진전거동에 미치는 영향", 한국해양공학회지 제1권, 제5호, pp 73~79

ASTM (1981). E647-81

ASTM (1998). E1426.

Gillespie, R. D. (1993). "Its effect on process consistency and resultant improvement in fatigue characteristics", Proc. of the 5th international conference on shot peening, Vol 1, oxford, pp 81~90.

Japan mechanic institute standard (1981). "Elastic-plastic deformation J_{IC} method of examination", JSME S 001-1981

John, M. Barsom and Stanley, T. Rolfe (1999). "Fracture and fatigue control in structures", Butterworth-Heinemam.

Kobayasi, H. (1993). "Fracture Mechanics", National publication corporation

Murakami, O. (1979). "A guide of Fracture Mechanics", O-Mu company, pp 121~127

Verpoort, C. M. and Gerdes, C. (1989). "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.

Wohlfahrt, H. (1984). "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.