

해양구조용강의 피로크랙진전특성에 미치는 쇼트피닝 투사속도의 영향

박경동* · 노영석*
*부경대학교 기계공학부

A Study on the Effect of Shot Velocity by Shot Peening on Fatigue Crack Growth Property for Marine Structural Steel

KYOUNG-DONG PARK* AND YOUNG-SOK NO**

*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, 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 such expensive tools, as well as a great deal of time and effort. Therefore, the improvement of fatigue strength and fatigue life through, the adoption of residual stress, is the main focus. The compressive residual stress was imposed on the surface according to each shot velocity(1800, 2200, 2600, 3000rpm) based on Shot-peening, which is the method of improving fatigue life and strength. By using the methods mentioned above, we 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. 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. Compressive residual stress of the surface on the Shot-peen processed operate resistance force of fatigue crack propagation.

1. 서 론

외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 외부하중 또는 금속 내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 파괴되어 버리는 현상을 발견 할 수 있는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다. 이와 같은 금속 내에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으며 현재와 같은 대형화된 산업사회에서 연구분야로서 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

해양재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연환을 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(ASM, 1998), 휴식기간의 부여등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 1927년 Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 금속표면의 경화 등을 시험한 것을 시초로 1935년에 Weibel이 엔진벨브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년 Zimmerli는 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 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의

제1저자 박경동 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100
051-620-1592 parkkd@pknu.ac.kr

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(Barsom and Rolfe, 1999)에 들어가면 피로균열 성장속도가 급격히 감소하여 ΔK_{th} 이하(임계영역)에서는 피로균열이 성장하지 않는다.

피로파괴의 대부분은 피로균열의 개시와 피로균열의 안정성장과정에서 소비되므로 피로균열의 개시와 안정성장과정의 해석과 예측이 매우 중요한 사항이 되고 있으며, 균열의 개시와 균열의 성장과정은 반복하중, 부식환경, 고온화경, 저온환경하에서 균열의 개시조건과 균열의 진전속도를 특성 짓는 것이 파괴역학의 파라미터로서 피로균열 전파속도 da/dN 또는 da/dt (a : 균열길이, N : 외력의 반복수, t : 재하시간)가 K 또는 ΔK 의 함수로서 $da/dN = f(\Delta K, K)$, $da/dt = f(K)$ 에 의해 파괴조건이 기술되어지는 선형파괴역학이 응용되고 있으며 응력 확대계수(K : Stress intensity factor)와 파괴인성(K_C : Fracture toughness)은 중요한 파라미터이다.

본 논문에선 실험에 적용하기 어려운 해양구조물, 선박용 스프링재료로 사용되고 있는 SUP-9강에 대해 종래에 발표되었던 Un-peening재와 비교해 피로수명 및 기계적 성질을 개선하고자 재료에 Shot-peening 가공처리를 한 후 진폭 10cycle/sec의 반복하중을 응력비 R=0.3으로 적용한 실험을 실시하여 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 프렛바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따른 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어 커터링 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 침단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장시험의 기본역학인 선형탄성과 파괴역학(LEFM)은 이상적으로 날카로운 균열을 전제로 하고 있다. 따라서, 기계 가공된 노치로부터 날카로운 예비균열을 성장시켜 가공된 노치의 영향과 균열 침단모양 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(이용복 등, 1999; Kobayasi, 1993).

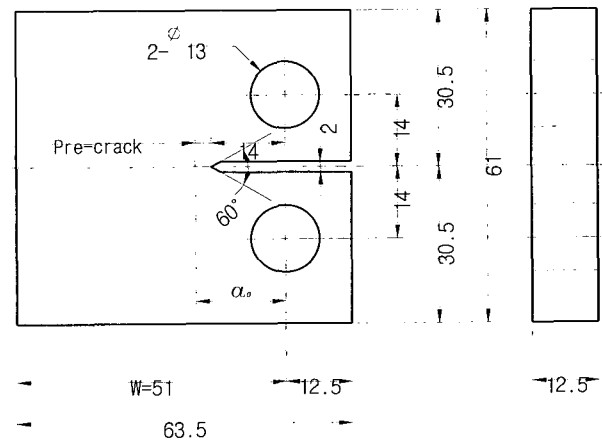


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

2.2 압축잔류응력의 부여

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편의 쇼트피닝 가공면에 균일한 압축잔류응력을 부여하기 위해 Fig. 2 형상의 치구에 고정하여 고속회전 터빈방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건 하에서 압축잔류응력의 크기가 각각 차이가 있는 4종류(1800, 2200, 2600, 3000rpm)의 시험편을 제작하였다.

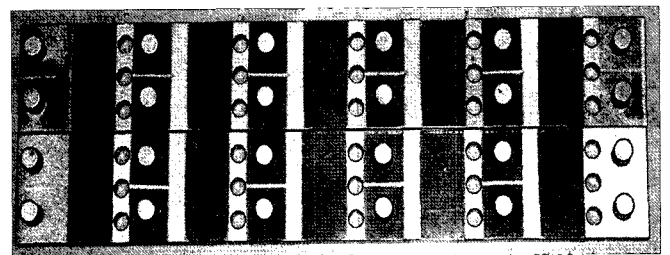


Fig. 2 Fixture of specimen

Table 3 Condition of shot-peening

| Content | Specimen A | Specimen B | Specimen C | Specimen D |
|-------------------------|------------|------------|------------|------------|
| Impeller Diameter (mm) | ∅490 | ∅490 | ∅490 | ∅490 |
| Shot Velocity (rpm) | 1800 | 2200 | 2600 | 3000 |
| 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 사용하였으며, 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 |
| ∅ | 0°, 15°, 30°, 45° | |
| | 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.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK를 10 MPa√m으로 하여 초기 ΔK의 95% 범위내에서 ΔK 증가 범으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기 크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95%범위내의 ΔK감소범으로 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.

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

$$\alpha = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \tag{1}$$

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK

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

및 응력비

$$R = K_{min} / K_{max} \tag{3}$$

의 함수가 되며, 여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 그것을 Paris 법칙(ASTM, 1981; Kobayasi, 1993; Japan Mechanic Institute Standard, 1981)인

$$da/dN = C(\Delta K)^m \tag{4}$$

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변하며 ΔK의 기울기는

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

da/dN의 측정범위 Δa ≤ 0.5mm이다.

여기서 C와 m은 각각 재료상수, 피로균열진전지수로서 이것으로 크랙진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 된다(박경동과 박상오, 2002; 정찬기와 박경동, 2002).

3. 실험결과 및 고찰

3.1 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로크랙 전파특성

Fig. 3은 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력을 X-ray 잔류응력 측정기로 측정하여 잔류응력 크기를 표면과 시편의 표면에서 내부 0.3mm에 분포하는 최대 압축잔류응력의 크기를 나타낸 그림이다. 그리고 Fig. 4는 쇼트피닝 가공에 의해 CT 시험편의 표면에 압축잔류응력이 생성된 스포링강 SUP-9에 Un-peened제와 Shot-peened제에 대하여 응력비 R=0.3, 사이클은 10Hz에서 상온(RT)에서의 점감하중법에 의해 피로균열 전파속도 da/dN과 응력확대계수 범위 ΔK의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

그림에서 알 수 있듯이 동일한 ΔK에서 쇼트피닝 가공된 Shot-peened제의 경우 피로균열 전파속도 da/dN의 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 쇼트피닝 가공의 투사속도에 따라 da/dN의 관계가 차이가 있음을 알 수 있다. 또한 실험 결과 Shot-peened제는 쇼트피닝 투사속도에 반응하여 Un-peened제보다 피로균열 전파초기영역(영역 I)에서의 하한계 응력확대계

수 ΔK_{th} 값이 증가하는 것으로 나타났다.

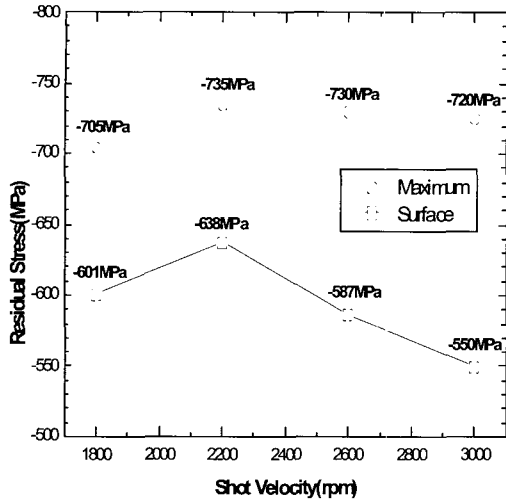


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot-peening

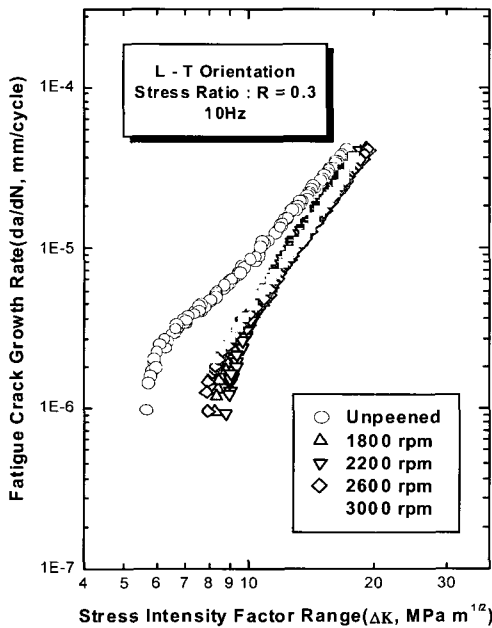


Fig. 4 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

그림에서 알 수 있듯이 Un-peened재의 경우는 2.5×10^{-6} mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(2200rpm)의 경우가 4.333×10^{-6} mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다.

이러한 현상은 쇼트피닝 투사속도에 의해 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 균열초기 피로저항성을 향상시킨 것으로 판단되며, 또한 쇼트피닝가공이 Un-peened재보다 피로수명 향상의

효과는 극표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속에 의한 것으로 판단된다.

1800rpm에서 3000rpm까지 쇼트피닝가공 투사속도 빠르기순서에 대해 각각 $8.319 \text{MPa} \sqrt{m}$, $8.797 \text{MPa} \sqrt{m}$, $7.835 \text{MPa} \sqrt{m}$, $7.352 \text{MPa} \sqrt{m}$ 으로 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 에 도달하였다.

쇼트피닝 투사속도에 따라 하한계 응력확대계수에 각각 도달한 것은 표면에 잔재해 있는 압축잔류응력이 피로균열진전 억제력으로 작용한 것으로 추정된다. 그리고 이러한 결과는 쇼트피닝 투사속도가 증가할수록 표면에 형성되는 투사에너지가 증가하여 Over peening 효과가 발생하는 것으로 판단된다 (Verpoort and Gerdes, 1989).

3.2 재료상수와 피로균열진전지수와의 관계

Fig. 5, 6에는 쇼트피닝 투사속도에 따른 피로균열진전지수 m 과 재료상수 C와의 관계를 나타낸 것으로 m은 투사속도 1800rpm에서 2200rpm까지 증가하다가 2200rpm 이후에서는 급격히 떨어지다가 다시 3000rpm까지는 완만히 감소하였으며 C와 m은 서로 반대의 경향으로 나타났다.

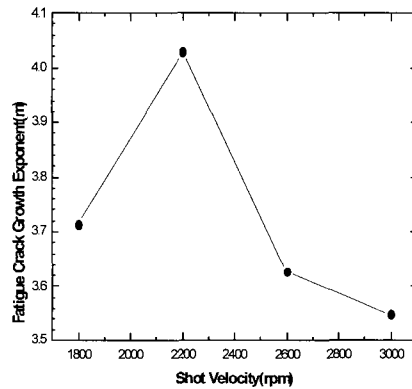


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth exponent m and shot velocity

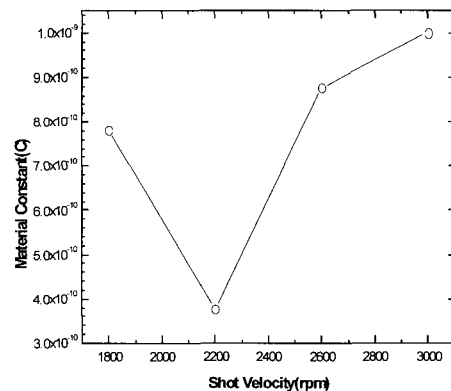


Fig. 6 Relation between material constant C and shot velocity

3.3 균열길이와 사이클수와의 관계

Fig. 7, 8은 COD 클립게이지에 의해 컴플라이언스 법으로 계산된 균열길이 a의 변화와 사이클수에 대한 응력확대계수 ΔK 관계를 나타낸 것으로 Shot-peened재가 Un-peened재보다 동일 균열길이 32mm에 대해 ΔK 가 높음을 알 수 있다. 투사속도에 따라서는 2200rpm의 경우가 ΔK 가 가장 높게 나타났다. 그리고 ΔK 감소경향은 쇼트피닝 가공의 경우와 Un-peened재의 기울기가 다소 비슷하게 감소하였다.

Fig. 8에서는 Un-peened재보다 Shot-peened재가 동일균열길이 32mm에 대해 사이클수가 훨씬 증가하였으며 쇼트피닝 투사속도에 따라서도 2200, 1800, 2600, 3000rpm의 순으로 사이클수가 증가하였다. 사이클수의 증가에 따라서도 ΔK 의 감소가 Un-peened재가 가장 급하게 감소하였고 Shot-peened재는 감소경향이 비슷하면서 완만하게 감소하였다. 동일 사이클 수 800,000회에 대해서도 Shot-peened재가 Un-peened재보다 ΔK 가 훨씬 높게 나타났다. 이는 피로균열진전지수 da/dN의 감소로 ΔK 에 영향을 미친 것으로 추정된다.

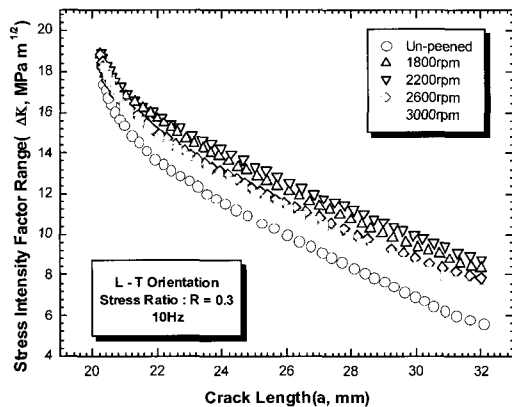


Fig. 7 Relation between stress intensity factor range ΔK_{th} and crack length a

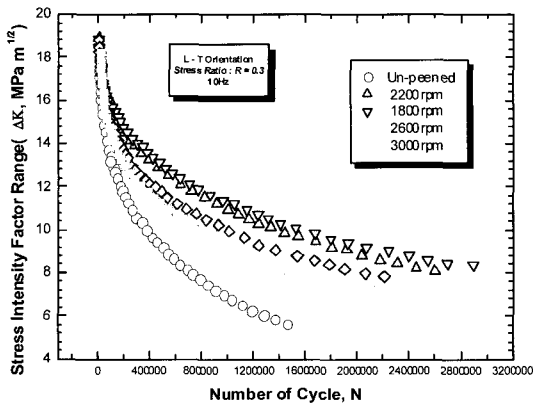


Fig. 8 Relation between stress intensity factor range ΔK and number of cycle N

Fig. 9에서 알 수 있듯이 투사속도에 따라 da/dN의 감소 경향은 비슷한 경사도로 감소하고 있으나 2200rpm이 가장 완만하게 3000rpm이 다소 완만하게 감소하였다. 또한 Un-peened재의 경우가 동일 균열길이 32mm에 대해 사이클수가 가장 작게 나타났으며 투사속도에 따라 3000, 2600, 1800, 2200rpm 순으로 사이클수가 증가하였다. 각각의 시편에서 균열길이 32mm와 32mm직전의 da/dN 값을 살펴보면 da/dN의 값에 비해 사이클수가 현저히 증가함을 볼 수가 있는데 이는 낮은 ΔK 에 있어 균열진전이 거의 없음을 알 수 있다.

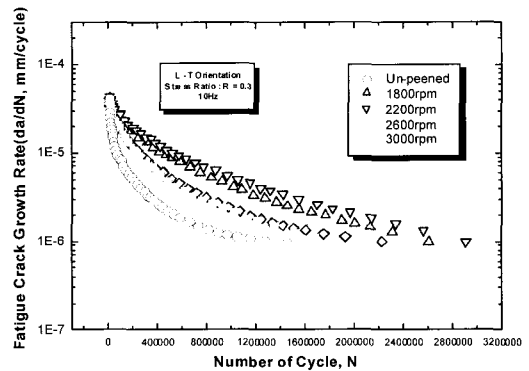


Fig. 9 Relation between fatigue crack growth rate da/dN and number of cycle N

Fig. 10에서는 Shot-peened재가 Un-peened재보다 사이클 수가 훨씬 많은 것을 볼 수가 있다. 그리고 동일 균열길이 28mm에 대해 쇼트피닝 투사속도에 따라 2200rpm의 경우는 1,376,649회, 1800rpm은 1,241,278회, 2600rpm은 1,119,635회, 3000rpm은 1,028,508회의 순서로 사이클 수가 나타났고 Un-peened재는 627,515회로 나타났다. 이는 Un-peened재에 비

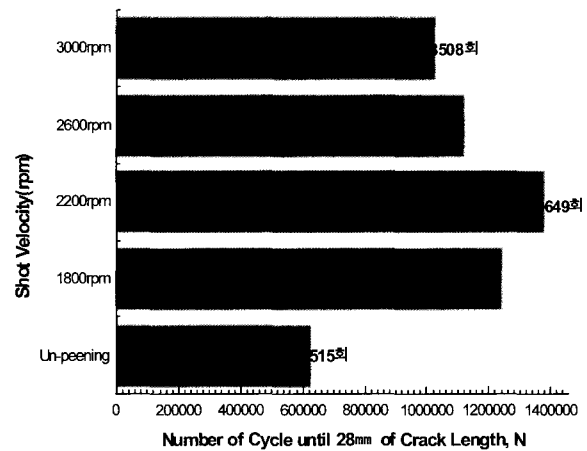


Fig. 10 Relations between shot velocity and number of cycle until 28mm of crack length

해 2200rpm의 경우는 약 2배, 3000rpm의 경우는 약 1.6배의 피로수명 향상의 효과를 보이고 있다.

이러한 현상은 쇼트피닝 가공에 의해 표면에 압축잔류응력이 생성되어 표면에서 균열선단의 구속으로 Shot-peened재가 Un-peened재보다 수명이 더 길며 쇼트피닝 투사속도에 따라 표면에 잔재하는 압축잔류응력의 크기가 다르게 피로균열진전 억지력으로 작용된 것으로 판단된다.

3.4 파단면의 특성

Fig. 11는 피로크랙진전 파면의 실물사진이며 Fig. 12는 Un-peened (a)와 쇼트피닝(2200rpm)된 shot-peened (b) 시험편의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면부의 30배 확대사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있다.

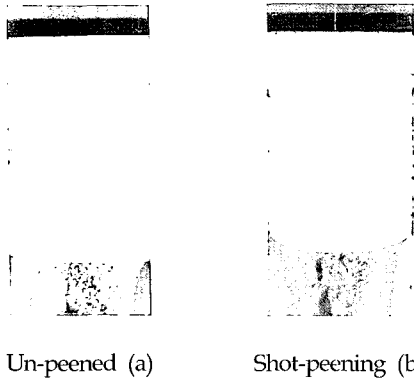


Fig. 11 Photographs of fracture surface

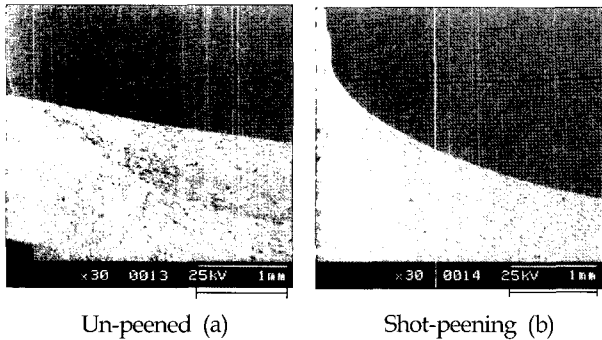


Fig. 12 SEM photographs of fracture surface

이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전과정에 서 극부표면에 형성된 압축잔류응력에 의해 외부에서 인장압축력이 반복적으로 작용시 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 피로균열진전기구에 작용하여 피로균열진전속도 da/dN이 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, 크랙전파특성 및 하한계 응력확대계수를 측정 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 동일한 ΔK에서 쇼트피닝 가공된 Shot-peened재의 경우 피로균열 전파속도 da/dN과의 양대수 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 쇼트피닝 가공의 투사속도에 따라 da/dN의 관계가 변화가 있음을 알 수 있었다.
- (2) da/dN-ΔK와의 관계에서 Un-peened재의 경우는 2.5×10^6 mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었고 쇼트피닝 가공(2200rpm)의 경우가 4.333×10^6 mm/cycle까지 양대수 직선관계가 성립되었다.
- (3) 크랙길이 a와 사이클수 N과의 관계에서 Un-peened재 보다 2200rpm의 경우는 약 2배, 3000rpm의 경우는 약 1.6배의 피로수명향상의 효과를 나타내었다.
- (4) 쇼트피닝 가공에 의해 표면에 잔재하는 압축잔류응력이 피로균열진전 억지력으로 작용한 것으로 나타났으며 투사속도 2200rpm의 경우가 가장 높고 투사속도 1800, 2600, 3000rpm 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 제16권, 제5호, pp 80-87

박경동, 손명균 (2002). "쇼트피닝 가공된 스프링강의 피로균열진전에 미치는 고온의 영향", 한국기계가공학회지, 제2권, 제1호, pp 22-31.

박경동, 정찬기 (2001). "JISG4081 SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향", 한국해양공학회 논문지, 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.

Barsom J.M. and Rolfe, S.T. (1999). Fracture and Fatigue Control in Structures, Butterworth-Heinemann.

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_{1c} Methodod of Examination", JSME S 001-1981.
- Kobayasi, H. (1993). Fracture Mechanics, National Publication Corporation.
- 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, pp 316-331.
-
- 2003년 1월 28일 원고 접수
 2003년 3월 21일 최종 수정본 채택