

쇼트피닝 가공된 해양구조용강의 피로파괴에 미치는 응력비의 영향

박경동* · 진영범** · 박형동**
*부경대학교 기계공학부
**부경대학교 기계공학부 대학원

Effect of Stress Ratio on Fatigue Fracture of a Shot Peening Marine Structural Steel

KYOUNG-DONG PARK*, YOUNG-BEOM JIN** AND HYOUNG-DONG PARK**

*Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea
**Dept. of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan, Korea

KEY WORDS: Marine Structural Steel 해양구조용강, Shot Peening 쇼트피닝, Crack Growth 균열성장, Stress Ratio 응력비, Threshold Stress Intensity Factor 하한계 응력확대계수, Fatigue Crack Growth 피로균열성장, Stress Intensity Factor 응력확대계수, Compressive Residual Stress 압축잔류응력

ABSTRACT: The lightness of components required in the automobile and machine industry necessitates the use of high strength components. In particular, the fatigue failure phenomena, which occurs when using metal, increases the danger to human life and property. Therefore, antifatigue failure technology is an integral part of current industries. Currently, the shot peening is used for removing the defect from the surface of steel, while improving the fatigue strength on surface. Therefore, in this paper, the effect of compressive residual stress of spring steel(IISG SUP-9) by shot-peening on fatigue crack growth characteristics in a stress ratio(R=0.1, R=0.3, R=0.6) was investigated, giving consideration to fracture mechanics. By using the methods mentioned above, following conclusions are drawn:

- (1) The fatigue crack growth rate(da/dN) of the shot-peening material was lower than that of the un-peening 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-peening material. Also m , fatigue crack growth exponent and number of cycle of the shot-peening material, was higher than that of the un-peening material, as concluded from effect of da/dN .
- (2) Fatigue life shows more improvement in the shot-peening material than in the un-peening material, and the compressive residual stress of surface on the shot-peen processed operate resistance of fatigue crack propagation.

1. 서 론

일반 산업과 해양구조물에 있어서 설계 및 구조건전성 평가 및 파손방지를 위한 다각적인 노력에도 불구하고 예기치 않는 파손사고가 일어나 인명이나 물적 재산에 많은 피해를 준다. 이에 대형 중요 구조물이나 항공기, 선박, 건설 등에서 구조물 파괴를 방지하기 위해 학문적 연구 분야로 파괴역학의 발전을 연구하고 있다. 재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 부품의 설계시 고려되는 금속의 고강도화, 고응력화는 부품의 경량화를 실현시킴으로서 재료절감과 고출력화 라는 이점을 갖고 있으나, 고응력화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동 조건에 따라 차이는 있지만 금속

표면 또는 금속내의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서 균열이 개시되고 서서히 안정성장 하여 최종적으로 급속히 파괴되는 현상이 발견 되는데 이러한 현상을 피로파괴라 한다. 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있기에 현재와 같이 대형화된 산업기술사회에 피로파괴의 방지 기술은 매우 큰 비중을 차지하고 있다 (박경동과 정찬기, 2001).

최근 신소재 개발로 인한 피로강도의 최적화를 위한 쇼트피닝 가공조건을 선택하려는 연구가 진행되고 있으며, 현재 쇼트피 가공의 연구는 선박, 항공기 및 자동차 분야에서 실용화되기 시작하였다. 또한 쇼트피닝 가공 한 재료의 중심부에서는 높은 인성을 유지하여, 피로하중을 받는 기계 구조물의 수명향상에 좋은 것으로 평가되고 있다(정성균과 이승호, 2001). 쇼트피닝 가공은 수많은 양의 쇼트볼을 일정한 속도로 금속표면에 투사하는 것으로서, 쇼트볼에 의해 타격된 금속 표면은 요철을 이루게 되고, 압축잔류응력층을 표면부 가까이에 형성하게 된다. 표면부 가까이에 형성된 압축잔류응력은 피로강도에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히 금속표면에 압축잔류응력

제1저자 박경동 연락처: 부산광역시 남구 용당동 산100

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

을 형성토록 함으로서 피로에 의한 균열의 전파 억지력을 향상시킬 수 있다(Gillespie, 1993; Wohlfahrt, 1984). 여기서 압축 잔류응력은 금속의 표면부에 되도록 가까이 형성될 수 있도록 하고, 또한 압축잔류응력이 높게 형성될수록 피로수명은 향상된다(박경동과 류찬욱, 2002; 박경도와 손명균, 2002). 이와 같이 쇼트피닝가공에 대한 연구의 중요성이 인식되어 쇼트피닝 가공조건, 쇼트피닝 불 선정, 압축잔류응력, 피로강도, 피로수명 등 다양한 연구가 진행되고 있으나, 국내에서는 쇼트피닝가공에 의해 형성되는 금속표면부의 압축잔류응력에 대한 체계적인 연구가 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 실험적으로 어려운 해양구조물, 선박용 스프링재료로 주로 사용되고 있는 SUP-9강에 대하여 Shot-peening 가공한 후 반복하중을 주파수 10cycles/sec, 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6으로 실험하여 피로강도 향상과 피로수명 향상에 대하여 연구하였다.

2. 실험장치 및 실험방법

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 and Tempering)한 시험편의 기계적 성질이다.

본 시험편은 피로균열 진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편으로 두께는 12.5mm로 하였고 시험편의 채취는 열간압연된 프렛바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어커팅 방전가공기에서 노치홈 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 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 감소하고 예상 경로를 명확히 하기 위해 표면을 샌드페이퍼 #1200으로 충분히 연마하였으며 25℃ 정도의 온도환경과 항복강

도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-93 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다(이용복 등, 1999; Kobayasi, 1993).

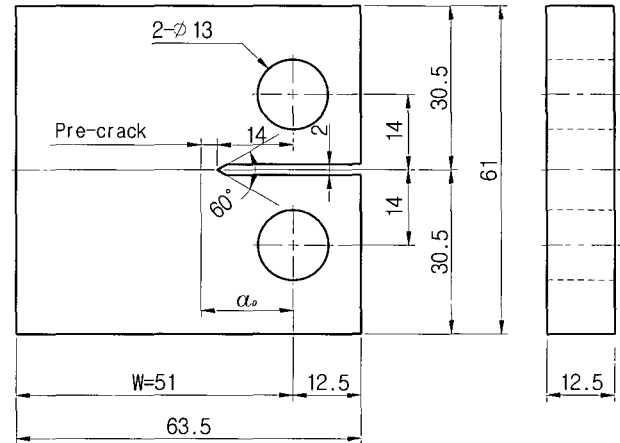


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

2.2 쇼트피닝 가공

2.1항과 같이 완성된 CT 시험편의 쇼트피닝 가공면에 균일한 압축잔류응력을 부여하기 위해 Fig. 2 형상의 치구에 고정시켜 Table 3과 같은 조건하에서 고속회전 터빈방식의 쇼트피닝기로 가공하였다.

Table 3 Condition of shot-peening(wt%)

Condition	Shot-Peening
Impeller Dia	490 mm
Blades Width /Q'ty	90 mm/6 pcs
Shot-velocity	70 m/s
Shot-Ball Dia	0.8 mm
Time	24 sec.
Arc Height(Alman A-Stip)	0.375 mm
Coverage	85 %

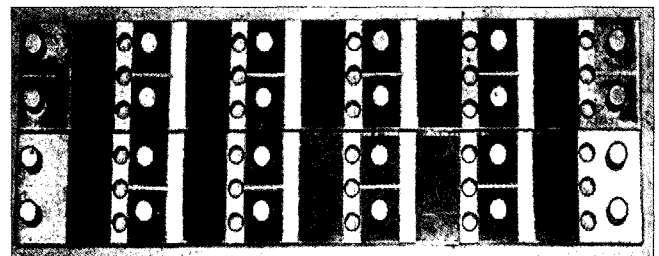


Fig. 2 Fixture of specimen

2.3 압축잔류응력

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(Rigaku - MSF2M)를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20μm 단

위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류 응력을 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°	
2θ	140° ~ 170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

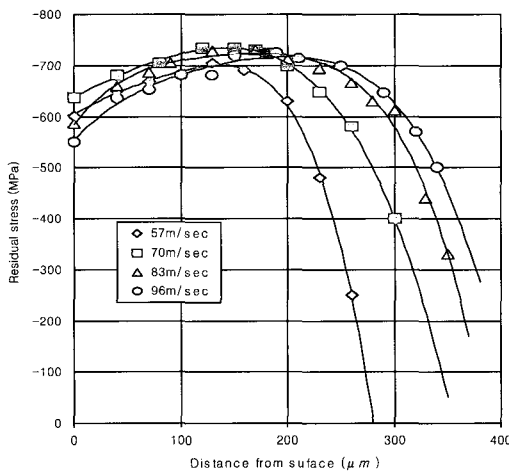


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot peening

Table 5 The Maximum of residual stress and depth

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

Fig. 3과 Table 5를 보면 투사속도 70m/sec에서 최대압축잔류응력이 형성되었고 70m/sec를 기점으로 그 이상의 속도에서는 점차 감소되는 것이 관찰되었다. 이 현상은 지나친 투사속도에 의하여 발생하는 과도한 투사에너지를 영향으로 피가공물의 압축잔류응력치를 오히려 감소시키는 오버피닝(over-peening) 현상으로 판단된다. 그리고 Tange and Takamuras(1990)는 금속의 표면 압축잔류응력값을 높일수록 피로강도가 증가하여 피로수명이 향상된다고 보고하였는데, 본 실험결과 투사속도가 70m/sec 일 때 표면의 압축

잔류응력이 가장높게 나타나므로 피로수명 향상에 가장 효율적인 투사속도는 70m/sec 로 판단된다(Tange and Takamuras, 1990).

2.4 피로균열진전 실험

피로균열 균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8501, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중 파형은 정현파로 하고 적용 응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6 주파수는 10Hz로 하였다. 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-93의 규정에 따라 상온에서 실험하였다.

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 10 MPa \sqrt{m} 으로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95% 범위내에서 ΔK 감소법으로 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

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

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

여기서, α 는 하중중심에서의 균열길이, W는 하중중심에서의 시험편길이, B는 시험편의 두께이며 ΔP 는 하중변위이다. 응력확대계수 범위 ΔK 와 응력비 R은 다음과 같으며,

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

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

여기서 R의 영향을 제외하면 특정의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어진다. 이 함수를 Paris 법칙(ASM E647-81, 1981; Kobayasi, 1993; Japan Mechanic Institute Standard, 1981)이라 하며,

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

양대수 선도상에서 직선적으로 변하며 ΔK 의 기울기는 다음 식에서 구할수 있다.

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

(da/dN의 측정범위 $\Delta a \leq 0.5\text{mm}$ 이다.)

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

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열 진전 실험결과

Fig. 4는 변형응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6에서 언피닝시편과 쇼트피닝 시편의 피로균열진전속도비 da/dN와 응력확대계수 ΔK의 관계를 도시하였다. 그림에서 피로균열진전속도비 da/dN를 수치적으로 비교하면, 응력확대계수 ΔK=10MPa√m 일 때, 언피닝의 경우 R=0.1에서 da/dN=8.38×10⁻⁶, R=0.3에서 da/dN=9.08×10⁻⁶, R=0.6에서 da/dN=1.15×10⁻⁵ 이고, 쇼트피닝의 경우는 R=0.1에서 da/dN=4.49×10⁻⁶, R=0.3에서 da/dN=5.32×10⁻⁶, R=0.6에서 da/dN=8.59×10⁻⁶로써 언피닝 및 쇼트 피닝 시편 모두 응력비가 증가할수록 피로균열진전속도비가 증가되는 경향을 보이고 있으나, 응력확대계수 ΔK가 작은 구간과 R=0.3이하의 응력비에서는 압축잔류응력의 영향이 현저하게 미치고 있다는 것이 확인되었다.

이와 같이 쇼트피닝가공에 의한 시험편 표면부의 압축잔류 응력은 초기균열진전뿐만 아니라 피로균열진전과정에서 균열 선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 작용하여 압축잔류응력이 증가할수록 하한계응력확대계수 ΔK_{th}가 높게 형성되는 것을 볼 수 있다.

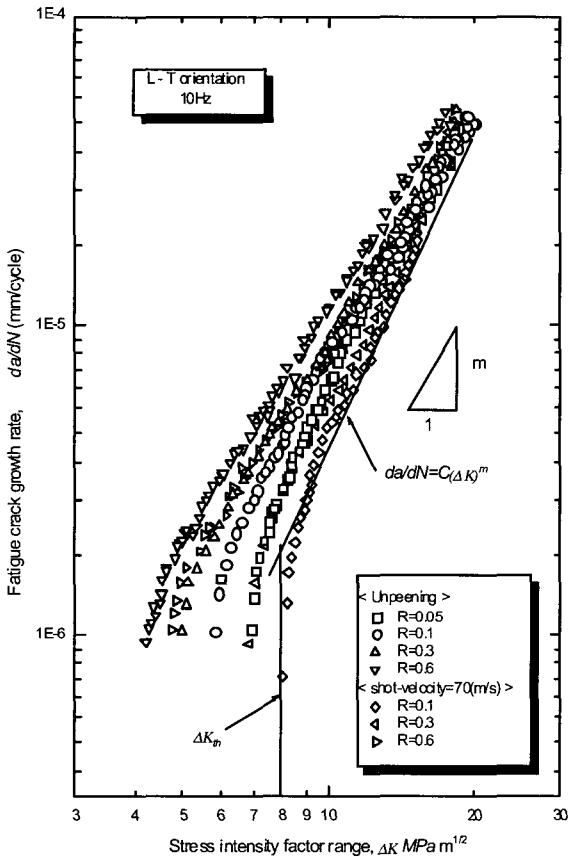


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

3.2 쇼트피닝 재료의 변형응력비에서 피로균열 진전길이의 반복 사이클 수의 관계

Fig. 5는 상온 25°C에서 쇼트피닝 시편을 변형응력비 R=0.1, R=0.3, R=0.6의 환경을 적용하여, 응력비별 균열길이 a와 하중 반복사이클 N과의 관계를 언피닝 시편의 결과와 비교 도시하였다. 그림에서 균열길이 28mm 지점을 기준으로 하여 수치로 비교하면 언피닝재의 경우 응력비 R=0.1에서 4.8×10⁵cycle, R=0.3에서 4.5×10⁵cycle, R=0.6에서 4.1×10⁵cycle로 나타났다. 그리고 쇼트피닝재의 경우 응력비 R=0.1에서 1.1×10⁶cycle, R=0.3에서 8.7×10⁵cycle, R=0.6에서 5.3×10⁵cycle로 나타났다.

각 응력비에서 피로수명은 쇼트피닝재가 언피닝재에 비하여 응력비 R=0.1에서 132%, R=0.3에서 93%, R=0.6에서 30%로 증가하였다. 이처럼 쇼트피닝재가 언피닝재보다 피로수명이 향상되었는데 이는 극표면에 생성된 압축잔류응력이 표면에서 균열선단의 구속력으로 작용하여 쇼트피닝재가 언피닝재보다 수명이 더 길어진 것으로 판단된다.

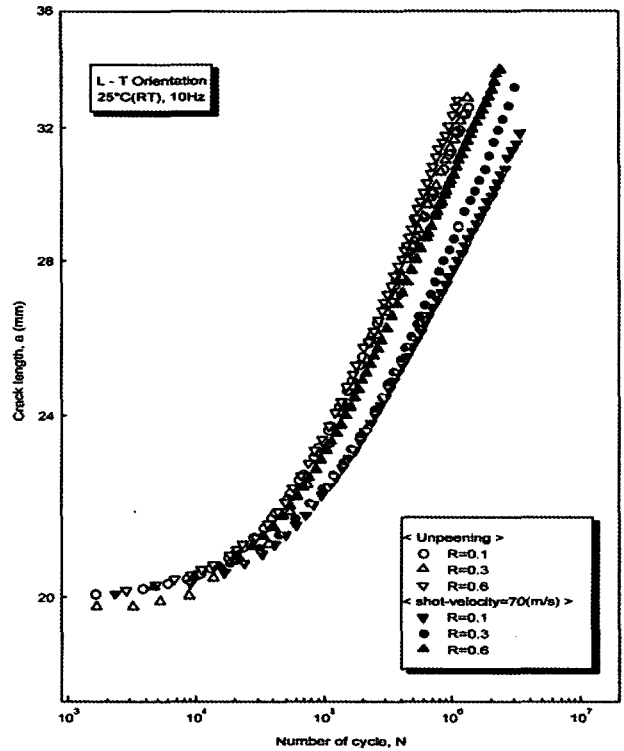


Fig. 5 Relation between crack length and number of cycle

3.3 하한계특성과 응력비와의 관계

Fig. 6과 같이 피로균열진전 1단계 영역에서 피로균열진전 속도비 da/dN는 ΔK가 작아짐에 따라 시험편의 탄성계수와 의 비례 관계로 인하여 감소되고 있고, 피로균열진전이 정지 되는 하한계응력확대계수 ΔK_{th}는 응력비가 증가함에 따라 감소되었다. 이와같이 응력비가 감소할수록 하한계응력확대 계수가 커지고 있는 현상을 고찰한 결과 하한계응력확대계수는 시험편의 환경 및 응력비와 같은 인자의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

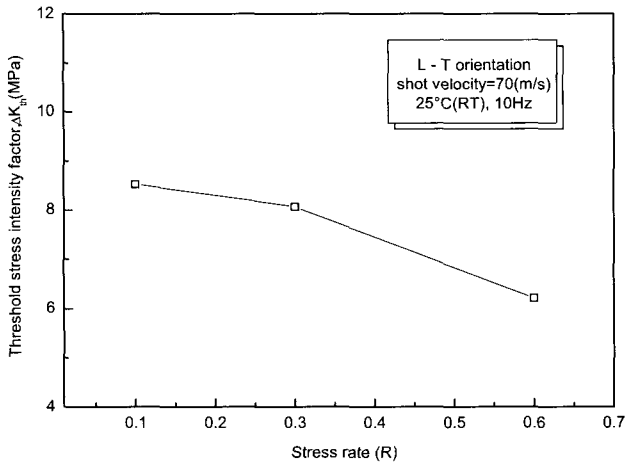


Fig. 6 Relation between threshold stress intensity factor range and stress ratio R

3.4 재료상수와 피로균열진전지수와의 관계

피로균열진전과정의 2단계 영역에서 $da/dN-(\Delta K)$ 는 양대수 선도상에서 직선 관계로 나타났다. Fig. 7에 Paris 식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 으로 상수 C와 m을 구하여 각 응력비와의 관계를 나타내었다. 2단계 영역에서 $da/dN-(\Delta K)$ 직선의 기울기 즉, 균열진전지수 m의 값은 응력비가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 재료상수 C값은 응력비가 증가할수록 크기가 증가한 것으로 나타났다. 균열진전지수 m값은 응력비가 증가할수록 감소하나 재료상수 C값에 비해 da/dN 에 대하여 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 판단된다.

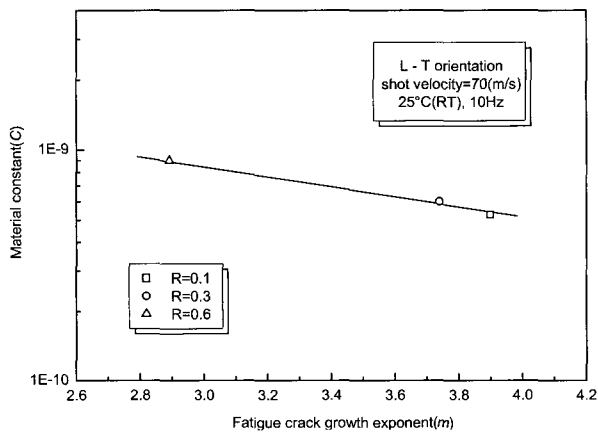


Fig. 7 Correlations between C and m in Paris equation

3.5 파단면의 특성

Fig. 8은 SUP-9강에 대하여 R=0.1, R=0.3, R=0.6의 조건에서 쇼트피닝제와 언피닝제에 대한 피로균열진전특성을 K-감소방식으로 시험한 후, 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경으로 촬영하여 나타내었다.

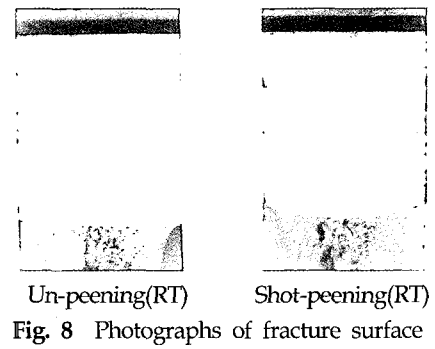


Fig. 8 Photographs of fracture surface

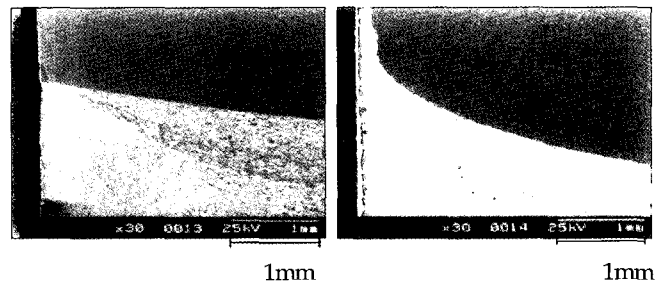


Fig. 9 SEM photographs of fracture surface

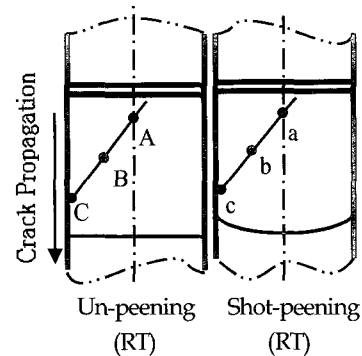
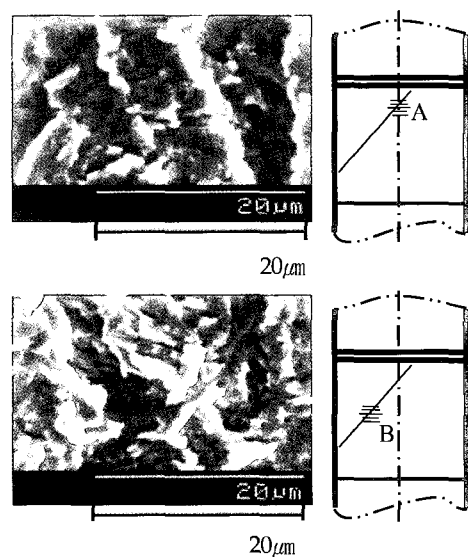


Fig. 10 Picture point of fracture surface



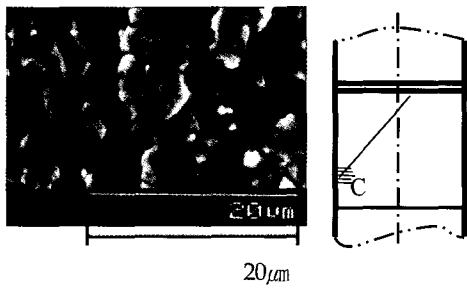


Fig. 11 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Un-peening, R=0.3)

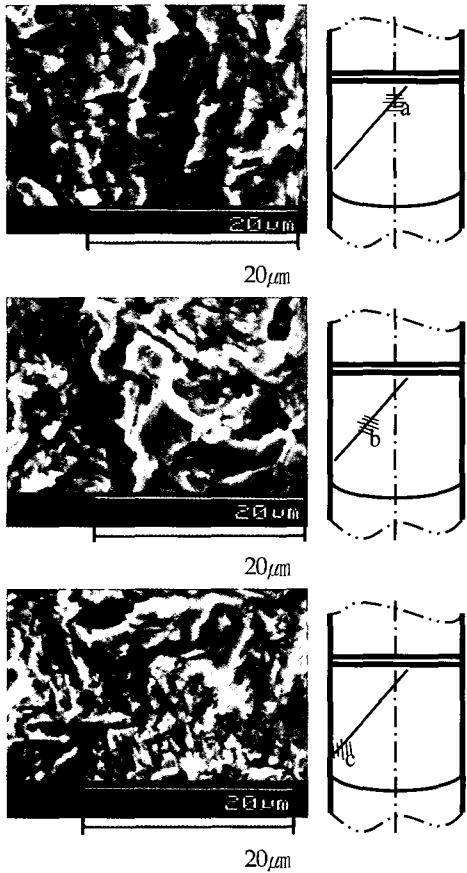


Fig. 12 Striation of fatigue crack propagation by SEM (Shot-peening, R=0.3)

Fig. 9은 시험편의 피로크랙진전파면에 대한 시험편 표면을 30배 확대한 사진으로서 파면의 양상이 현저한 차이를 보여주고 있으며, 이현상은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 피로균열진전 과정에서 균열선단 소성영역을 구속하므로 피로 균열진전이 지연되는 현상을 관찰할 수 있다.

Fig. 10은 파단면을 미시적으로 관찰하기 위한 SEM 사진촬영 지점이고, Fig. 11~12는 각 지점의 2000배 확대 사진으로서 각 지점의 파면양상을 미시적으로 관찰한 결과 시편표면부에 형성된 압축잔류 응력은 피로균열진전 과정에서 그림과 같이 균열선단 소성영역 중심부와 표면부의 스트라이에이션 방향형성에 현저한 차이가 있었다.

4. 결 론

쇼트피닝 가공한 스프링강(JISG SUP-9)의 압축잔류응력이 피로균열 진전거동에 미치는 영향을 조사하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 동일한 ΔK 에서 쇼트피닝 가공된 쇼트피닝재의 경우 피로 균열전파속도 da/dN 과의 양대수 관계가 직선적으로 증가하고 있으며 응력비에 따라 da/dN 의 관계가 변화가 있음을 알 수 있었다.
- (2) 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 R=0.3 이하의 응력비에서는 피로균열진전거동에 영향을 주어 피로균열진전에 대한 구속력이 강하게 미치고 있지만, R=0.3 이상의 응력비에서는 압축잔류응력의 구속이 감소되었다.
- (3) 피로균열진전 파단면의 양상관찰에서 쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력이 피로균열선단 소성영역내의 탄소성변형기구에 작용하여 피로균열진전이 억제되었다.
- (4) 쇼트피닝 가공재의 경우에 연피닝재보다 각 응력비에서 피로수명의 향상을 보이고 있다. 피로수명의 향상은 극 표면에 생성된 압축잔류응력이 균열선단의 구속력으로 작용하기 때문으로 생각된다.

후 기

본 논문은 한국과학재단 지정 부경대학교 친환경 첨단에너지 기계연구센터의 지원(과제번호 : R12-2003-001-02002-0)에 의하여 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

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). "쇼트피닝 가공된 스프링강의 피로균열진전에 미치는 고온의 영향", 대한기계학회 부산지부 춘계학술대회, pp 30-34.

박경동, 정찬기 (2001). "JISG4081 SUP7-DIN50CrV4강의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향", 한국해양공학회지, 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, 제16권, 제5호, pp 73-79.

ASTM (1981). E647-81

Tange, A. and Takamura N. (1990). "Relation between

- Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Vol 1, Tokyo, pp 81-90.
- 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 J1C Method of Examination", JSME S 001-1981.
- Kobayasi, H. (1993). Fracture Mechanics, National Publication Corporation, Tokyo, pp 57-63.
- 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 81-90.
-
- 2003년 9월 25일 원고 접수
2004년 5월 7일 최종 수정본 채택