

스프링강의 피로크랙진전 특성에 미치는 쇼트피닝 투사속도의 영향

박경동* · 노영석**

*부경대학교 기계공학부

**부경대학교 기계공학과 대학원

An Effect of Shot Velocity of Shot-peening on A Property of Growth Behavior of Fatigue Crack for Spring Steel

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

*Pukyong National University Busan , Korea

**Pukyong National University Busan , Korea

KEY WORDS: Shot-peening 쇼트피닝, Compressive Residual Stress 압축잔류응력, Growth Behavior of Fatigue Crack 피로균열 성장거동, Shot velocity 투사속도, Fatigue Life 피로 수명

ABSTRACT: In this study, an effect that compressive residual stress formed by shot-peening the surface of spring steel(JISG SUP-9) at each shot velocity(1800, 2200, 2600, 3000rpm) on the fatigue crack growth property and threshold stress intensity factor, ΔK_{th} , was examined. Followings are the result

- (1) Compressive residual stress on surface of specimen was determined at each -601 MPa(1800rpm), -638 MPa(2200rpm), -587 MPa(2600rpm), -550 MPa(3000rpm) by shot velocity of shot peening and threshold stress intensity factor, ΔK_{th} , fatigue crack growth rate, da/dN , on fatigue crack growth is obstructed by the compressive residual stress was determined at each $5.619 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Un-peening), $8.319 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (1800rpm), $8.797 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (2200rpm), $7.835 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (2600rpm), $7.352 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (3000rpm)
- (2) Existing compressive residual stress by effect of shot velocity of shot-peening on relation of crack length, a , and number of cycle, N , was 2 times progressed in case of 2200rpm than specimen of Un-peening on fatigue life. And fatigue life was 1.6 times progressed incase of 3000rpm by Over peening.
- (3) Fatigue life of Material on Paris' law, $da/dN = C(\Delta K)^m$, that effect of material constant, C , and fatigue crack growth exponent, m , was influenced by effect of C and m

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(村上, 大南, 1979). 이와 같은 금속 내에서 발생하는 피로파괴현상은 인류의 인명과 재산에 커다란 재앙을 초래할 수 있으며 현재와 같은 대형화된 산업사회에서 매우 큰 비중을 차지하고 있다.

재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의

수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로서 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 특히 최근 기계, 항공기, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과 재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있지만 고가의 기기와 많은 시간, 노력을 필요로 한다는 많은 문제점을 갖고 있다.

피로수명의 연장방법으로는 피로손상보수, 잔류응력의 부여 (ASTM, 1998), 휴식기간의 부여 등의 방법이 있으며 잔류응력을 도입하여 피로수명 및 성질을 개선하는 방법인 쇼트피닝에 의해 표면에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 1927년 E.G.Herber가 높은 곳에서 강판에 작은 강구를 낙하시켜 금속 표면의 경화 등을 시험한 것을 시초로 1935년에 Weibel이 엔진벨브스프링에 다량의 쇼트볼을 투사시켰으며 1940년에 F.P.Zimmerli는 금속표면처리 심포지엄에서 코일 스프링에 쇼트피닝을 처리한 결과 피로강도가 42% 증가된다는 것을 실증

제1저자 박경동 연락처: 부산시 남구 용당동 산100

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

하여 미국의 자동차와 항공부품업계에서 지속적으로 연구하고 실용화함으로써 SAE 쇼트피닝 위원회에서는 쇼트피닝 가공에 대한 규격과 작업표준안을 제정하게 되었다(정성균 외, 2001).

이러한 쇼트피닝가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중에 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시킨다(Gillespie, 1993, Wohlfahrt, 1984). 그리고, Verpoort 와 Gerdes(Verpoort and Gerdes, 1999)는 쇼트볼이 가하는 투사 에너지를 변화 시켜보기 위해서 쇼트볼의 질량, 속도, 투사량을 변경하여 시험한 결과 쇼트피닝할 때 에너지가 높은 것만이 좋은 것은 아니고 적절한 쇼트조건을 가지는 것이 좋다는 연구를 하였다. 또한 Tange, Takamura(Tange and Takamura, 1990)와 Natto, Ochi(Natto and Ochi, 1990)는 쇼트피닝의 압축잔류응력과 피로크래진전과의 관계를 연구한 결과 피로균열진전 수명에 있어서 표면에 형성된 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다.

한편, 영역 II에서의 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 M. Barsom, Stanley T. Rolfe, 1999)에 들어가면 피로균열성장속도가 급격히 감소하여 ΔK_{th} 이하에서는 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, 고온환경, 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 fracture)와 파괴인성(K_C : Fracture toughness)은 중요한 파라미터이다.

선형파괴역학(Linear elastic fracture mechanics)은 1959년 Irwin에 의해 제정된 이래 매우 활발히 연구한 결과 새로운 학문체계로서 완성이 가고 있다. 균열근방의 탄성응력장을 특징짓는 파라미터 K 를 사용하여 식 $K \leq K_C/S$ 에 의해 취성과 파괴를 방지하는 조건을 기술하려는 입장이 소위 선형파괴역학이며 기본적으로 탄성해석에 의해 파괴조건이 기술되므로 균열선단근방에 생긴 소성역이 균열이나 다른 부재 치수에 비하여 매우 작다는 소위 소규모항복범위(Small scale yielding)에서의 파괴문제에 대해 유효하다(장동일 외, 1984).

본 논문에서는 실험적으로 어려운 자동차용 스프링재료로 많이 사용되고 있는 SUP-9강에 대하여 종래에 발표되었던

Un-peening재와 앞서 피로수명 및 기계적 성질을 개선하고자 Un-peening재에 Shot-peening 가공하여 반복하중을 진폭 10cycle/sec로서 응력비 $R=0.3$ 로 실험하여 피로강도 향상과 피로수명 향상에 대하여 살펴보았다.

2. 실험 및 유한요소해석

2.1 시험편

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 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.

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

본 시편은 피로균열 진전거동을 관찰하기 위하여 CT시험편은 두께 13mm로 하였고 시험편의 채취는 열간압연된 플랫바 상태에서 L-T방향으로 채취하였다. 각부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 Fig. 1과 같으며 외형가공은 밀링으로 노치홈은 와이어커팅 방전가공기에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.

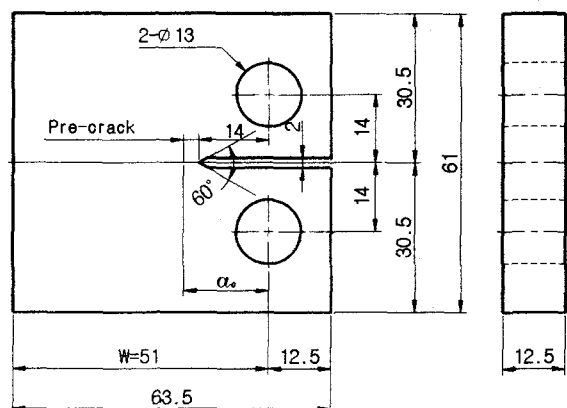


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

그리고 기계 가공된 노치는 실제로는 매우 둔한 첨단을 갖는다. 이에 비하여 피로균열성장시험의 기본역학인 선형탄성파

피역학(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 감소하고 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 외, 1999, 小林英南, 1993).

2.2 압축잔류응력 부여

21항과 같이 완성된 CT 시험편에 균일한 쇼트피닝 가공면의 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.

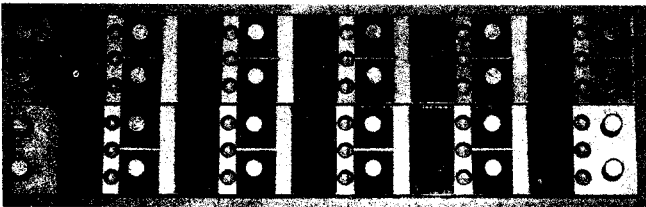


Fig. 2 Fixture of specimen

Table 3 Condition of Shot-Peening

Content	Specimen A	Specimen B	Specimen C	Specimen D
Impeller Diameter (mm)	ø490	ø490	ø490	ø490
Shot Velocity (rpm)	1800	2200	2600	3000
Shot Ball Diameter (mm)	ø0.8	ø0.8	ø0.8	ø0.8
Arc-Height (mm)	0.32	0.39	0.42	0.46

2.3 실험 방법

2.3.1 실험장치

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 850, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용하중파형은 정현파로 하고 적용 응력비 $R=0.3$, 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-95a 규정에 따라 상온에서 실험하였다. Fig. 3은 전기유압서보 피로시험기이다.

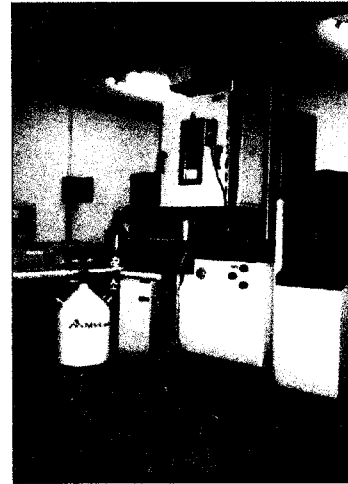


Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine

2.3.2 압축잔류응력의 측정

쇼트피닝 가공된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기를 사용하였으며, 측정은 전해연마기로 시험편의 측정 부위를 10~20 μ m 단위로 연마 해가면서 Table 4와 같은 X선 측정 조건하에서 잔류응력을 측정하였으며 표면부의 압축잔류응력, 최대치의 압축잔류응력을 Fig. 4에 나타내었다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
X-Ray Source	Target	Cr-V
	Voltage	30KV
ϕ	Current	10mA
	0°, 15°, 30°, 45°	
2 θ	140° ~ 170°	
	Calculation method	
Diffraction	2 θ - $\sin^2\phi$	
	Scintillation Counter	

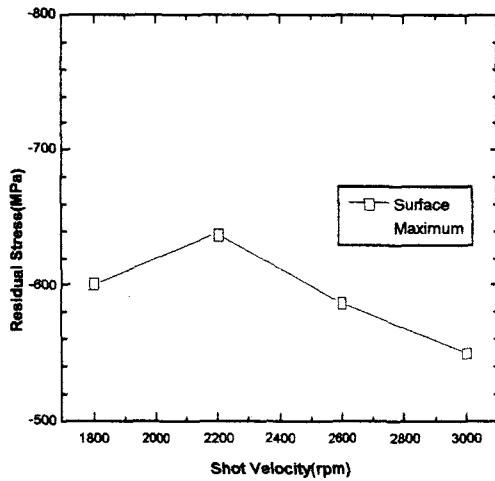
Fig. 4 Compressive residual stress distributions produced by shot-peening

표면에서의 쇼트볼 가공에 의한 압축잔류응력의 분포를 살펴보면 임펠러의 회전속도가 2200rpm의 경우가 -638MPa로 가장 높고 2600, 3000, 1800rpm 순으로 측정되었다. 최대 압축잔류응력 역시 2200rpm의 경우가 -735MPa로 최대로 측정되었다. 2600, 3000rpm은 Over peening의 결과로 2200rpm의 경우보다 최대 압축잔류응력이 낮게 측정되었다.

2.3.3 피로시험

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

시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 10



MPa \sqrt{m} 으로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위내에서 ΔK 증가 범으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였고 초기 크랙진전길이 3~5mm 지점에서 다시 95%범위내의 ΔK 감소범으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK 의 계산식은 다음과 같다.

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

$$a = a/W \quad (a/W \geq 0.2) \quad (1)$$

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

실험해석을 위해 응력확대계수 ΔK 는

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

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(ASTM E647-81, 1981, 小林英南, 1993, 日本機械學會基準, 1981)인

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

으로 나타내고 양대수 선도상에서 직선적으로 변하며 ΔK 의 기울기는

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

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 있게된다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 피로균열 성장거동

Fig. 7은 JISG SUP-9강의 CT시험편으로 응력비 $R=0.3$ 에서 상온(RT)에서 피로균열전파속도 da/dN 과 응력확대계수 범위 ΔK 의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 결과값이다.

Shot-peening 가공된 재료중에서 쇼트피닝 투사속도에 따라 임계영역에서의 하한계 값이 차이가 있음을 알 수가 있다. Un-peening재에 쇼트볼 가공에 의해 표면에 압축잔류응력의 효과로 Un-peening재와 달리 Shot-peening 가공된 재료가 임계영역에서의 하한계 값이 높음을 볼 수가 있다. 이는 시편 표면에 잔재해 있는 압축잔류응력이 피로균열 성장거동에 영향을 미쳐 압축잔류응력이 소멸될 때까지 피로균열성장 억제의 원인으로 사료된다. 그리고, 피로균열진전곡선에서 직선부분은 중간속도영역(영역 II)으로 Paris 법칙을 따라 $da/dN = C(\Delta K)^m$ 식이 성립한다. Fig. 5에서 임계영역에서의 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} , 피로균열 진전속도 da/dN , 재료상수 C , 피로균열진전지수 m 을 Table 5에 도시화하였다.

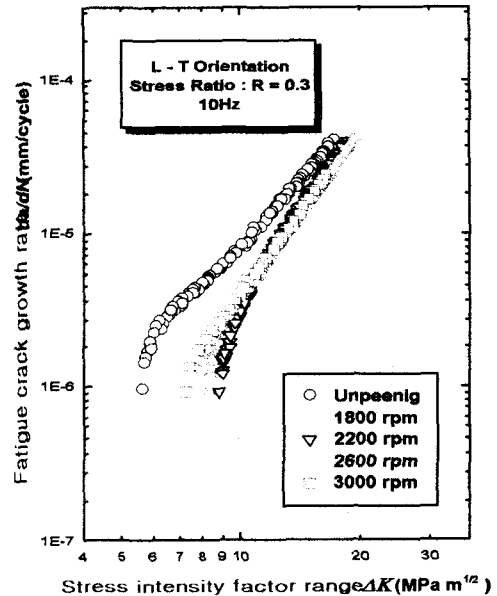


Fig. 5 Relations between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range

Table 5 Experimental Constants by $da/dN = C(\Delta K)^m$ for the Fatigue Crack Growth

	ΔK_{th}	da/dN Range (mm/cycle)	m	C
Un-peening	5.619	$4.138 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.273 \times 10^{-5}$	2.603	2×10^{-8}
1800rpm	8.319	$4.431 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.13$	3.714	7.815×10^{-10}
2200rpm	8.797	$4.333 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.01$	4.029	3.763×10^{-10}
2600rpm	7.835	$4.04 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 4.12$	3.627	8.773×10^{-10}
3000rpm	7.352	$3.697 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 2.534 \times 10^{-5}$	3.549	1×10^{-9}

응력확대계수 $\Delta K=10 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때 피로균열진전속도는 Un-peening의 경우 $da/dN=8.522 \times 10^{-6}$, 쇼트피닝 2200rpm의 경우는 $da/dN=3.46 \times 10^{-6}$ 으로 압축잔류응력의 영향으로 2.46배의 피로수명에 지연효과가 있었고 쇼트피닝 3000rpm의 경우는 $da/dN=4.48 \times 10^{-6}$ 으로 13% 감소한 1.9 배의 피로수명의 지연효과가 있었다. 이 현상은 Shot ball 투사 속도가 증가할수록 표면에 형성되는 투사에너지가 증가하여 Over peening 효과로 판단된다(Verpoort, C. M. and Gerdes, C., 1989).

3.2 크랙길이와 사이클수의 관계

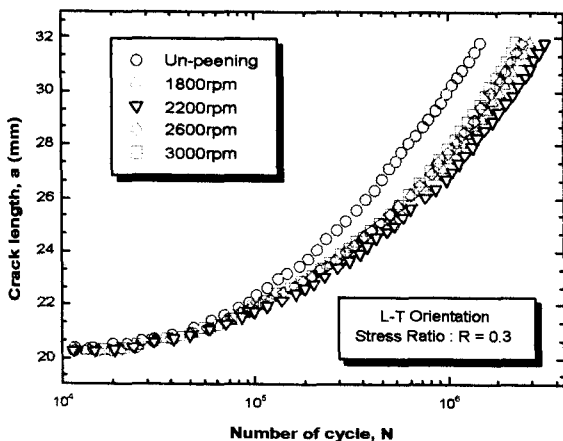


Fig. 6 Relation between crack length and number of cycle

Fig. 6은 크랙진전길이와 하중가진 횟수의 관계 그래프이며 크랙길이 28mm 지점에서 하중가진 횟수는 Un-peening의 경우는 $N=615,158$ 회이며 쇼트피닝 2200rpm의 경우는 $N=138,240$ 회로서 약 2배의 피로수명 향상이 있었고, 쇼트피닝 3000rpm의 경우는 $N=980,720$ 회로서 Over peening 효과가 있지만 1.6 배의 피로수명 향상의 결과를 보여주고 있다. 이 역시 쇼트피닝 투사속도에 의해 시험편 표면에 각각 다른 압축잔류응력이 잔재하여 피로수명 향상에 영향을 미친 것으로 사료된다.

3.3 쇼트피닝 투사속도(rpm)에 따른 재료상수 C, 피로균열진 전지수 m과의 관계

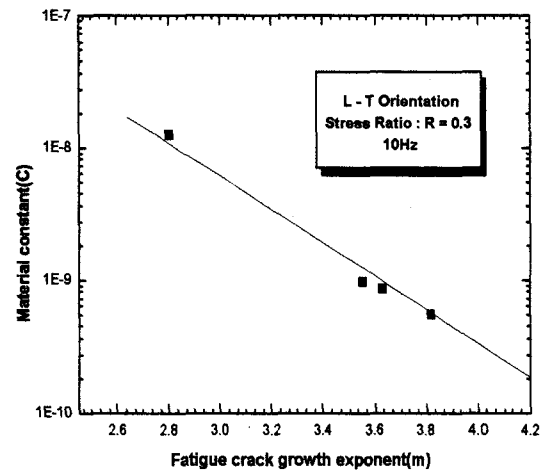


Fig. 7 Correlation between C and m in Paris' law

Fig. 7은 재료상수 C와 피로균열진전지수 m과의 관계를 나타낸 것이다. 이 그래프는 Paris 법칙, $da/dN = C(\Delta K)^m$, 을 따르고 C, m의 영향에 의존하며 재료의 피로수명, 잔존수 명과 안전설계에 중요한 척도가 된다.

5. 결 론

스프링강(JISG SUP-9)의 표면을 투사속도별(1800, 2200, 2600, 3000rpm)로 쇼트피닝가공하여 형성된 압축잔류응력이 피로균열 진전특성 및 하한계응력확대계수에 미치는 영향을 연구하였다. 그 결과는 다음과 같다.

(1) 쇼트피닝 투사속도에 따라서 시험편의 표면에 압축잔류응력이 각각 -601MPa(1800 rpm), -638MPa(2200 rpm), -587MPa(2600 rpm), -550MPa(3000 rpm) 측정되었으며 이 압축잔류응력이 피로균열진전속도 da/dN 에 피로균열진전 역지력을 작용하여 하한계 응력확대계수 ΔK_{th} 가 5.619 $\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ (Un-peening),

8.319MPa(1800rpm), 8.797MPa(2200rpm), 7.835MPa(2600rpm), 7.352MPa(3000rpm)으로 측정되었다.

(2) 균열길이 a와 사이클수 N의 관계에서도 쇼트피닝 투사속도에 영향을 받아 잔재하는 압축잔류응력이 피로수명에 Un-peening 시편보다 2200rpm의 경우가 약 2배의 향상을 나타냈으며 Over peening 된 3000rpm의 경우에도 1.6배의 피로수명 향상으로 나타났다.

(3) 재료상수 C와 피로균열진전지수 m과의 관계에서도 역시 표면의 압축잔류응력이 피로균열진전속도 da/dN에 영향을 미치므로 Paris 법칙, $da/dN = C(\Delta K)^m$, 을 따르는 C, m의 영향에 의해 재료의 피로수명 향상에 영향을 미친다.

참 고 문 헌

- 박원조, 허선철 (2001). "시스템 설계 강도학", 선학출판사, pp 236~244.
- 이용복, 김호경, 정진성 (1999). "피로해석의 기초", 청문각.
- 양치훈, 신광선 (1997). "Bulletin of the Korean Inst. of Met. & Mat", Vol 10, No. 3.
- 장동일, 정경섭, 한민구 (1984). "파괴역학", 원창출판사, pp 316~331.
- 정성균, 이승호 (2001). "쇼트피닝 가공개론", 세화출판사, pp 6~12.
- ASTM (1993). E647-93
- ASTM (1998). E1426-98
- 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.
- John M. Barsom and Stanley T. Rolfe (1999). "Fracture and fatigue control in structures", Butterworth-Heinemann.
- Notto, K. Ochi, T, Takahashi, T. and Suzuki, T (1990). "Effect of shot peening on the fatigue strength of carburized steels", Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp 519~526.
- snyder, R. M. and Darms, D. (1967). "Nonlinear Response of Buoy Shapes", Transactions of the 2nd Int. Buoy Technology Symposium/Exposition, Vol 1, pp 156~160.
- Tange. A. and Takamura, N (1990). "Relation between Shot-peening residual stress distribution and fatigue crack propagation life in spring steel", Proc. The 4th International conference on shot peening, Tokyo, pp 243~253.
- 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.
- 小林英南 (1993). "破壊力學", 共立出版株式會社
- 日本機械學會基準 (1981). "彈塑性破壞引性 J_{1C}試驗方法", JSMe S 001-1981
- 村上, 大南 (1979). "破壊力學入門", オーム社, pp 121~127