

균열진전 특성 개선을 위한 2단 쇼트피닝 가공

이승호*, 심동석#

2-Step Shot Peening Process for the Improvement of Fatigue Crack Growth Properties

Seoung-Ho Lee*, Dong-Suk Shim#

ABSTRACT

In this study, to investigate the effects of 2-step shot peening at the surface of spring steel, crack growth tests are conducted on spring steel and shot peened specimens. And then the residual stresses and fractographs are examined. The crack growth equation that can describe the whole crack growth behavior is used to evaluate the experiment results. The results show that fatigue crack grows slowly in the shot peened specimen than in the unpeened. And in the case of the 2-step shot peened specimen the initial stress intensity factor range and the fracture toughness is higher than the unpeened specimen due to the compressive residual stress. Fractographs show that the compressive residual stress of the surface suppress the fatigue crack opening and consequently slow crack growth rates.

Key Words : 2-step Shot Peening Process(2단 쇼트피닝 가공), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Fatigue Crack Growth(피로균열진전), Initial Stress Intensity Factor Range(초기응력확대계수범위), Fracture Toughness(파괴인성), Crack Opening(균열열림)

1. 서 론

쇼트피닝(shot peening)은 기계부품의 신뢰성 및 피로강도를 향상시키기 위한 냉간가공법으로써 사용이 증대되고 있다. 쇼트피닝의 효과는 주로 표면에 발생하는 압축잔류응력에 기인한다고 보고 되고 있다.

쇼트피닝 가공에 의한 압축잔류응력의 효과에 대한 연구는 주로 S-N 곡선에 대하여 피로수명의 향상

및 피로한도의 증가에 대하여 이루어지고 있다^[1-5]. 그러나 쇼트피닝 가공 처리는 노치 등의 응력집중부위가 있는 구조물에 행하는 경우가 많아 균열의 진전에 대한 평가 또한 중요하다. 그러나 이에 대한 연구는 극히 적은 실정이다.

Tange 등^[6] 및 Nelson 등^[7]은 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력과 피로 크랙진전과의 관계를 연구한 결과 피로 균열 진전 수명에 있어서 표면에 형성된 잔류응력은 매우 중요한 인자이며 최대 잔류응력이 표면에 가까울수록 피로수명이 증가함을 연구하였다. 그러나 이들의 연구는 균열진전에 대한 쇼트피닝의 효과를 압축잔류응력에 연관하여 피로수명의 향상에

* 경기공업대학 정밀계측과

교신저자 경기공업대학 메카트로닉스과

E-mail dssm@kinst.ac.kr

기여하는 것으로 설명할 뿐 균열진전의 전체 과정에 대한 쇼트피닝의 효과를 설명하지는 못하고 있다. 이는 균열진전의 과정을 효과적으로 묘사할 수 있는 일반적인 균열진전식이 없기 때문이다.

본 연구에서는 균열진전 특성을 개선하기 위한 방안으로 극 표면의 압축잔류응력을 높이기 위한 2단 쇼트피닝 가공을 제안하고 이의 효과를 저자가 제안한 균열진전식^[8]을 이용하여 평가하였다. 제안된 균열진전식은 완만한 S자의 비선형적인 균열진전의 전체 거동을 묘사할 수 있으며, 균열의 진전이 이루어지는 균열진전의 초기값과 파괴가 일어나는 응력까지 평가할 수 있다. 따라서 이를 평가하여 균열진전 특성을 개선하기 위한 2단 쇼트피닝의 효과를 정량적으로 평가하였다 또한 파면분석을 통하여 이의 효과를 증명하였다

2. 이론해석

피로균열진전거동은 균열진전속도 da/dN 와 응력 확대계수범위 ΔK 의 관계로 표현되고 있다 Paris와 Erdogan^[9]은 처음으로 이의 관계를 수식으로 나타내었다 그들은 균열진전의 지배적인 영역인 da/dN - ΔK 그래프의 선형적인 부분에 대하여 다음과 같은 실험식을 보고하였다

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서 C 와 m 은 실험에 의하여 얻어지는 재료 상수이다 이식은 간편하여 피로균열진전을 평가하는 식으로 많이 사용되어 오고 있다

그러나 피로균열진전과정은 선형적이기보다는 완만한 S자형태의 비선형성을 나타내고 있다 따라서 이러한 비선형적인 거동을 정확히 표현하려는 시도가 지속적으로 이루어져왔다 최근에 Kim과 Shim^[8]은 Forman^[10]의 균열진전식을 수정하여 균열진전의 전과정을 묘사할 수 있는 새로운 균열진전식을 보고하였다 이들이 보고한 식은 균열진전의 발생영역뿐만 아니라 정적인 파손영역까지를 평가할 수 있는 식으로 다음과 같다

$$\frac{da}{dN} = Z \frac{C(\Delta K - K_o)^m}{(1-R)K_c - \Delta K} \quad (2)$$

여기서 K_c 는 파괴인성이고 K_o 는 응력확대계수 범위의 초기값으로 $\Delta K = K_o$ 에서 $da/dN \approx 0$ 이다 이 식에서 Z 는 랜덤변수로 균열진전의 변동성을 나타내며 균열길이 및 응력상태에 관계없는 변수이다

식 (2)의 상수 K_c , K_o , C 와 m 은 다음과 같이 얻어진다 먼저 식 (2)의 양변에 대수를 취하고 Z 에 대하여 정리한 후에 각각의 실험결과에 대한 값으로 나타내면 다음과 같다.

$$\log Z_i = \log \left[\{ (1-R)K_c - \Delta K_i \} \left(\frac{da}{dN} \right)_i \right] - \log C - m \log (\Delta K_i - K_o) \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3)$$

식 (3)에서 $\log Z_i$ 는 잔류치 이다 따라서 이 값들은 평균이 0이고 정규분포를 따른다고 가정할 수 있다 그리고 식 (2)의 균열진전식이 실험결과를 정확히 나타내기 위해서는 $\log Z_i$ 의 분산이 최소의 값을 가져야 한다 이러한 제한조건을 이용하여 최적화 기법을 사용하면 식 (2)의 재료상수 값을 구할 수 있다

3. 시험방법

3.1 재료 및 시험편

사용된 재료는 자동차용 기계요소부품의 소재로 사용되고 있는 스프링강(SPS5A)을 열처리한 것으로 이의 화학적 성분은 Table 1과 같다 열처리조건은 880 °C에서 30분간 가열후 유중에서 퀴칭(quenching)하고 500 °C로 70분간 템퍼링(tempering)하였다 Table 2는 스프링강의 열처리 전, 후의 기계적 성질 이다.

피로균열진전시험에 사용된 시험편은 폭 50.8 mm 의 CT형 표준시험편으로 두께는 8mm 이다. 시험편의 채취방향은 압연방향과 부하방향이 평행하고 균열의 진전방향이 이에 수직인 L-T방향이다 사용된 시험편은 모두 열처리하였으며, 열처리 후 2단 쇼트 피닝 가공하였다

Table 1 Chemical composition of SPS5A. (wt%)

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SPS5A	0.61	0.27	0.84	0.01	0.01	0.83	0.03	0.12

Table 2 Mechanical properties of SPS5A

	Yield strength	Tensile strength	Fracture strength	Elongation	Hardness
Raw material	720 MPa	920 MPa	740 MPa	18.5 %	HV280
Heat treatment	820 MPa	1230 MPa	900 MPa	15.1 %	HV350

Table 3 Conditions of shot peening

Content	1-step peening	2-step peening
Shot ball diameter	0.6 mm	0.4 mm
Impeller revolution speed	3,100 rpm	3,100 rpm
Impeller diameter	360 mm	360 mm
Time	8 min	6 min
Coverage	90 %	98 %
Arc height (Almen A strip)	0.375 mm	0.42 mm

3.2 쇼트피닝 가공 및 잔류응력측정

쇼트피닝 가공은 임펠러의 원심력을 이용하는 기계식 쇼트피닝기를 이용하였다. 지름 0.6 mm 쇼트볼을 투사하여 1차 가공을 한 후, 지름 0.4 mm의 쇼트볼로 투사하여 2단으로 처리하였다. 가공 조건은 Table 3과 같다. 이렇게 2단계의 가공을 행하는 것은 재료의 표면에 더 큰 압축 잔류응력을 발생하게 하기 위해서이다. 쇼트피닝의 가공량을 측정하는 아크하이트(arc height)는 알멘게이지로 측정하였다. 사용된 알멘스트립은 A형이며 1단에서 0.375 mm의 아크하이트를 얻었으며, 2단에서는 0.42 mm의 아크하이트를 얻었다. 또한 커버리지는 1단에서는 90 %, 2단에서는 98 %로 나타났다.

시험편의 잔류응력 분포는 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF-2M)를 사용하였으며 계산법은 2θ-sin2Ψ법을 이용하였다. 잔류응력측정은 먼저 측정하고자

하는 부위의 두께를 측정하고, 두께가 측정된 부위에서 표면층의 잔류응력을 측정한 후, 전해연마를 실시하며 반복하여 시험편의 표면부에서 중심부로 0.25 mm까지 측정하였다.

3.3 피로균열진전시험

피로균열진전 시험은 ASTM E647^[11]에 의거하여 상온의 대기중에서 100 kN용 유압서보식 시험기를 이용하여 일정진폭하중하의 피로시험을 행하였다. 사용된 하중파형은 정현파로 극대하중이 4.5 kN이고 응력비 R이 0이다. 실험주파수는 10 Hz로 하였고 균열길이의 측정은 컴플라이언스법(compliance method)을 이용하였다.

4. 시험결과 및 고찰

4.1 압축잔류응력과 피로균열진전거동

Fig. 1은 시험편의 표면에서 중심방향으로 0.25 mm 영역까지 측정된 잔류응력의 분포이다. 그림에서 보는바와 같이 시험편의 표면에서 0.25 mm까지 측정된 결과, 최대 압축잔류응력은 1단과 2단 시험편에서 깊이 0.07 mm에서 최대값 543.3 MPa로 측정되었다. 그러나 시험편 표면에서의 압축잔류응력은 1단에서는 466.8 MPa, 2단에서는 519.7 MPa로 약 52.95 MPa 개선됨을 알 수 있다.

Tange 등^[6]은 극 표면에 압축잔류응력의 값이 증가할수록 재료의 피로강도가 증가됨을 보고하고 있다. 이의 연구에 의하면 재료의 피로수명은 균열이 표면에서 압축잔류응력이 최대가 되는 위치까지 전파하는 동안에 대부분을 차지하므로 극 표면의 압축 잔류응력이 클수록 피로수명의 향상은 크다.

Fig. 2는 최대하중 4.5 kN 하에서 균열길이 a와 하중 반복수 N의 관계를 나타내고 있다. 그림에서 점선은 쇼트피닝 가공을 하지 않은 재료의 결과이며 실선은 2단 쇼트피닝 가공을 한 재료의 결과이다. 그림에서 보는바와 같이 2단 쇼트피닝 가공한 시험편에서 균열진전수명이 증가함을 알 수 있다. 이는 Glinka^[12]와 Frost 등^[13]에 의하여 보고된 바와 같이 쇼트피닝 가공에 의하여 시험편의 표면

에 형성된 압축잔류응력이 피로균열의 진전에 영향을 미쳐 피로수명을 향상시켰기 때문이다.

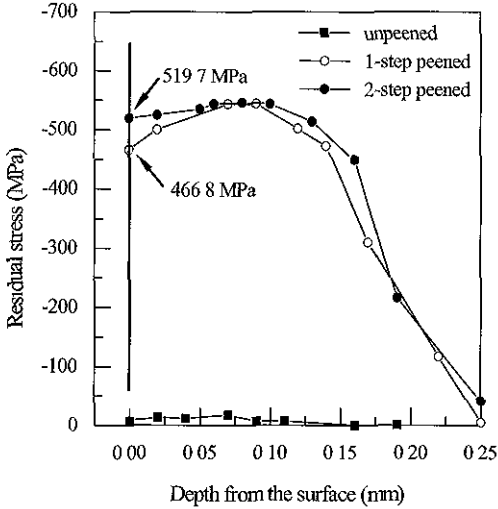


Fig. 1 Compressive residual stress distribution

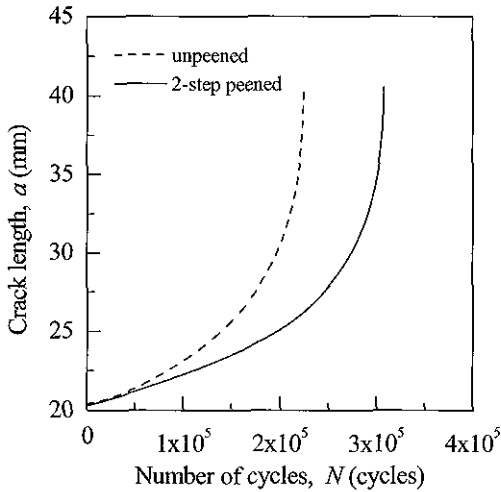
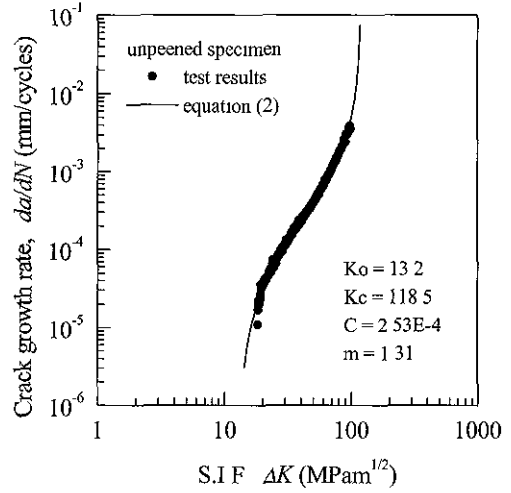


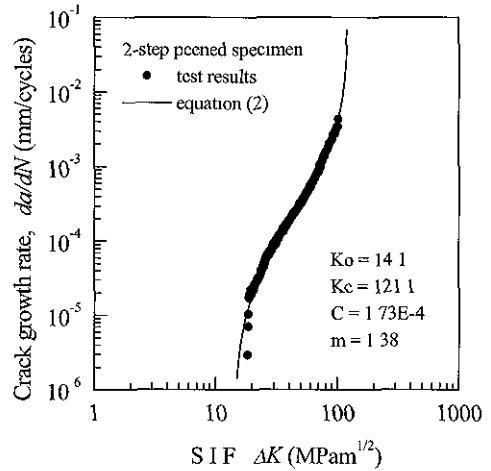
Fig. 2 a-N curves of spring steel

4.2 균열진전 특성의 평가

Fig 3(a)와 (b)는 Fig. 2의 실험결과를 $da/dN-\Delta K$ 그래프의 형태로 나타낸 것이다. 그림에서 각 점들은 실험결과를 나타내고 있으며 실선은 식 (2)에 의하여 평가된 결과를 나타낸 것이다.



(a) unpeened specimen



(b) 2-step shot-peened specimen

Fig. 3 da/dN-ΔK curves of spring steel

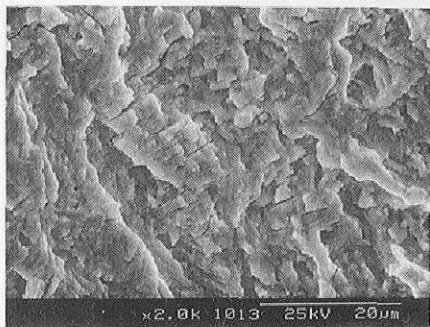
균열진전 거동은 그림에서 보는 바와 같이 완만한 S자 형태의 비선형성을 이루고 있으며 제안된 균열진전식은 이러한 거동을 잘 묘사하고 있다. 따라서 피로균열진전에 대한 쇼트피닝 효과는 식(2)의 상수 값을 비교함으로써 정량적으로 평가 할 수 있다

먼저 균열의 진전이 시작되는 K_o 의 값에 대하여는 쇼트피닝 가공을 한 시험편이 $0.9 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (약 7%)높은 값을 나타내고 있다 이는 시험편에 발생한

압축잔류응력이 균열의 열림을 억제하기 때문으로 생각된다. Hammand와 Meguid^[14]는 쇼트피닝에 의한 잔류응력에 따른 균열진전에 대한 연구에서 압축잔류응력으로 인하여 표면부의 미시균열의 진전이 억제된다고 보고하였다.

재료의 파괴인성을 나타내는 K_{IC} 값도 2단 쇼트피닝 가공을 한 시험편에서 높게 나타나고 있으나 이 값의 차이는 2% 정도이다. 이는 정적인 파손 영역에서는 쇼트피닝의 효과가 적음을 의미한다. 재료의 정적인 파손은 시험편 내부의 균열진전력에 의하여 지배적인 영향을 받으므로 시험편의 표면에 발생한 압축잔류응력의 영향을 크게 받지 않는다. 따라서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력은 균열진전의 초기에 많은 영향을 미치는 것으로 사료된다.

4.3 파면해석



(a) Unpeened specimen. (×2000)



(b) 2-step peened specimen. (×2000)

Fig. 4 Fatigue fracture surface

Fig. 4는 시험편의 ΔK 가 $20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때의 파단면을 주사전자현미경(SEM S-2300, Hitachi)으로 관찰한 사진이다. (a)는 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 파단면 사진이며, (b)는 2단 쇼트피닝 가공된 파단면 사진이다. (a)에서 미시피로균열의 전파양상은 기울기가 급하고 직선적이지만, (b)에서는 균열의 전파 양상이 쇼트피닝 가공을 하지 않은 시험편에 비해서 현저히 표면부에서 완만해지는 것을 볼 수 있다. 시험편의 미시균열 진전방향이 2단 쇼트피닝 가공으로 표면부에서 압축잔류응력으로 인하여 균열의 진전을 억제하므로 피로 균열의 방향이 완만히 변화됨을 볼 수 있다. 이는 Hammand 등^[13]의 쇼트피닝에 의한 잔류응력에 따른 균열진전에 대한 연구에서와 같이 압축잔류응력으로 인하여 표면부의 미시균열 진전이 억제되었기 때문이다.

5. 결 론

본 연구에서는 균열진전 특성을 개선하기 위한 방안으로 극 표면의 압축잔류응력을 높이기 위한 2단 쇼트피닝 가공을 제안하고 이의 효과를 새로운 균열진전식으로 평가하여 검토하였다. 이로부터 얻어진 결론은 다음과 같다.

1. 2단 쇼트피닝 가공은 1단 쇼트피닝 가공보다 시험편의 극 표면에 더 큰 압축잔류응력을 발생시킨다.
2. 시험편의 표면에 발생한 압축 잔류응력은 초기 응력확대계수범위 K_{IC} 를 7% 향상시켰다. 이는 미시균열의 진전을 억제하여 피로수명을 증가 시킨다.
3. 재료의 파괴인성을 나타내는 K_{IC} 은 2단 쇼트피닝 가공을 한 시험편에서 2% 정도 높게 나타났다. 이는 정적인 파손 영역에서는 쇼트피닝의 효과가 적음을 의미한다.
4. 파면분석 결과 피로균열진전 양상은 균열 진전방향의 기울기가 완만해지고 표면부에서 꺾임으로 지연됨을 알 수 있다. 이는 표면부에서 균열이 열리는 것을 압축잔류응력이 균열의 진전을 구속해 주기 때문이다.

참고문헌

- 1 Lee J. K. and Kim J. K., "Influence of Residual Stress Due to Shot Peening on Fatigue Strength and Life", Transaction of KSME A, Vol. 21, No 9, pp 1498~1506, 1997
2. Lee S. H. and Kim H. S., "The Effect of 2-Step Shot Peening on the Fatigue Behavior of Spring Steel", Transaction of KSME A, Vol. 23, No 1, pp. 140~147, 1999
- 3 Yozo, K., Shinzaburo, T. and Masaki, K., "Effect of Shot Peening on Fatigue Strength of Ti-6Al-4V Alloy at Elevated Temperatures", Journal of The Society of Materials Science in Japanese, Vol 45, No 1, pp. 43~47, 1996
4. Natto, K., Ochi, T., Takahashi, T. and Suzuki, T., "Effect of Shot Peening on the Fatigue Strength of Carburized Steels", Proc The 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp 519~526, 1990.
- 5 Lyu, S. K., Inoue, K. and Kato, M., "Effect of Surface Treatment on the Strength of Carburized Gear", Proc International Gearing Conference, London, pp 183~188, 1994.
- 6 Tange, A. and Takamura, N., "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, 1990
- 7 Nelson, D. V., "Effect of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation", ASTM STP 776, pp 172~194, 1982
- 8 Kim, J. K. and Shim, D. S., "The Variation in Fatigue Crack Growth due to the Thickness Effect", International Journal of Fatigue, Vol 22, pp 611~618, 2000
- 9 Paris, P. C. and Erdogan, F., "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws.", Journal of Basic Engineering, Vol 85, pp. 528~534, 1960
- 10 Forman, R. G., Keary, V. E. and Engle, R. M., "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic Loaded Structures.", Journal of Basic Engineering, Vol 89, pp. 459~464, 1967
- 11 "Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates", Annual Book of ASTM Standard E647-95a, 1997.
- 12 Glinka, G., "Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldments under Constant and Variable Loads", ASTM STP 677, pp 198~214, 1979.
- 13 Frost, N. E., Marsh, K. J. and Pook, L. P., Metal Fatigue, Clarendon Press, Oxford, 1974.
- 14 Hammond, D. W. and Meguid, S. A., "Crack Propagation in the Presence of Shot-peening Residual Stresses", Engineering Fracture Mechanics, Vol 37, No 2, pp 373~387, 1990