Transactions of KSAE, Vol. 14, No. 3, pp.88-94 (2006)

Copyright © 2006 KSAE
1225-6382/2006/081-12

현가장치재의 부식피로균열진전에 미치는 쇼트피닝의 영향

박 경 동* · 안 재 필

부경대학교 기계공학부

An Effect of Shot Peening on Corrosion Fatigue Crack Growth of Suspension Material

Keyungdong Park* · Jaepil An

Department of Mechanical Engineering, Pukyoung National University, Busan 608-739, Korea
(Received 21 September 2005 / Accepted 7 December 2005)

Abstract : The compressive residual stress, which is induced by shot peening process, has the effect of increasing the intrinsic fatigue strength of surface and therefore would be beneficial in reducing the probability of fatigue damage. However, the effect of shot peening in corrosion environment was not known. In this study, investigated is the effect of shot peening on corrosion fatigue crack growth of SAE 5155 steel immersed in 6% $FeCl_3$ solution and corrosion characteristics with considering fracture mechanics. The results of the experimental study corrosion fatigue characteristics of SAE 5155 are as follows; the fatigue crack growth rate of the shot peening material was lower than that of the non-peening material. And fatigue life shows more improvement in the shot peening material than in non-peening material. This is due to the compressive residual stress of surface increases resistance of corrosion fatigue crack propagation. It is assumed that the shot peening process improve corrosive resistance and mechanical property.

Key words : Compressive residual stress(압축잔류응력), Corrosion fatigue crack growth(부식피로균열성장), Fatigue life(피로수명), Shot peening(쇼트피닝), Corrosion characteristics(부식특성)

1. 서 론

현대 산업에서 기계부품이나 구조물은 경량화 및 고강도화를 요구함에 따라 여러 가지 고강도강이 개발되어 현재 사용되고 있다. 그러나 금속의 고강도화는 오히려 여러 가지 변수에 의해 항복이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 안정성장하여 최종적으로 급속히 파괴되는 현상이 발생된다.[1] 또한 부식 환경에서는 부식과 피로가 동시에 작용하여 강도가 현저히 떨어지는 양상을 나타내고 있다. 따라서 현재 가혹한 부식 환경 조건 등에서의 사용빈도가 증가하고 있는 추세를 감안해볼 때 다양한 환경조건이 재료의 피로균열에 어떠한 영향을 주는가에 대한 연구가 절실히 요구되어 진다.[2-4] 자동차 현가장치의 재료로 사용되고 있는 SAE 5155강의 경우 해풍이 심한 지역이나 겨울철의 경우 염소이온에 의한 기계적 특성의 열화현상이 발생하고 있는 실정이다. 더욱이 환경오염의 심각성으로 대기중에 염화물이 포함되어 수분이나 산성비에 의해 유입됨으로써 부식에 의한 손상은 더 가속화될 수 있다.

현재 자동차나 기계부품의 피로수명 향상을 위해 쇼트피닝 공법이 널리 사용되고 있고, 쇼트피닝의 효과에 대한 연구는 여러 가지 실험들을 통해 이미 입증한 바 있다.[5,6] 그러나 부식 환경에서 부식피로

*Corresponding author. E-mail: parkkd@pknu.ac.kr

균열진전거동에 미치는 쇼트피닝의 효과에 대해서는 아직 연구가 이루어지고 있지 않은 실정이다.

따라서 본 논문에서는 쇼트피닝에 의해 생성된 압축잔류응력이 부식피로균열성장에 어떠한 영향을 주는지 파괴역학적인 관점에서 관찰하여 피로수명평가를 실시하고자 한다. 더 나아가 피로균열진전 거동의 각 단계별 구간에서의 부식피로균열 파단면 관찰을 통해 부식 환경에서의 피로균열진전을 예측함으로써 부식으로 인한 손상을 줄이고, 자동차의 수명향상에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 쇼트피닝

본 연구에 사용된 시험편은 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 SAE 5155강으로서 그 화학적 성분을 Table 1에 나타내었다. Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시험편의 기계적 성질을 나타낸 것으로, 경도는 표면으로부터 100㎛ 깊이의 로크웰 경도값(Ball diameter. : 10 mm, 하중: 3000 kg)이다. 부식 환경에서의 피로균열진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 ASTM E647-93의 규정에 따라 가공하였고, 그 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 그 후 쇼트피닝 머신에 의해 투사속도 70㎧로 ∅ 0.8mm 쇼트볼을 사용하는 연속식 콘베어에서 상온으로 양면 쇼트피닝 가공을 실시하였다. 쇼트피닝 가공 후 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보기 위해 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF2M)를 사용하여 전해연마기로 측정 부위를 20㎛ 단위로 연마해 가면서 측정한 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 압축잔류응력의 최대값은 표면으로부터

Table 1 Chemical compositions of SAE 5155 steels [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
SAE 5155	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

Table 2 Mechanical properties of SAE 5155 steels after heat treatment

Materials	Tensile strength (MPa)	Hardness (HrC)		Elongation (%)
		After quenching	After tempering	
SAE 5155	1350	57	44	9.4

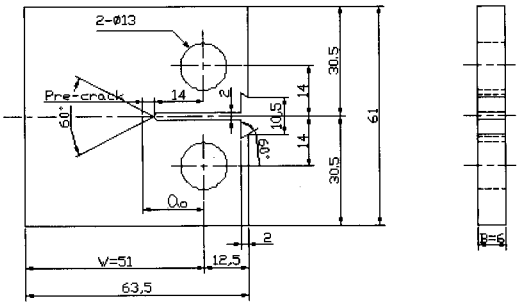


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

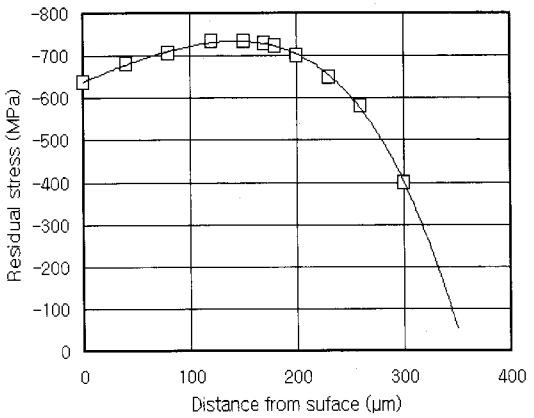


Fig. 2 Compressive residual stress distribution produced by shot peening

110㎛에서 -735㎫의 형성되어 있는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 실험방법

앞서 가공한 시험편을 피로균열진전과정에 미치는 환경요인을 분석하기 위해 부식용액에 침지시킨 후 피로균열진전 실험을 실시하였다. 따라서 침지기간동안의 부식특성과 피로실험에서의 피로균열진전과의 관계를 규명하여 피로수명을 예측하고자 한다.

2.2.1 부식조건 및 방법

부식실험을 위한 용액으로는 탈기처리하지 않은 6%$FeCl_3$수용액을 사용하였고, 온도는 25°C로 일정하게 유지시킨 후 침지를 시켰다. 침지기간동안에 부식특성을 살펴보기 위해서 매 24시간마다 Fig. 3과 같이 부식전위를 측정하였으며, 무게감소량은

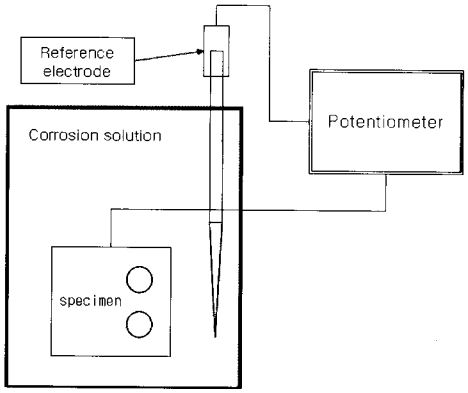


Fig. 3 Schematic diagram of potentiometer

시험완료 후 측정하였다. 부식전위는 염화은 전극을 기준전극으로 시험편을 작업전극으로 하여 측정하였으며, 무게감소량은 5일, 15일, 30일, 60일, 90일마다 측정하였다.

2.2.2 피로균열진전실험

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(INSTRON 8821S)에 의한 하중제어 방식으로 실험을 하였다. 적용하중 파형은 정현파로 하고, 응력비 R=0.05, 주파수는 10Hz, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 측정하였으며, ASTM E647-93에 의거 ⊿K감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다. 본 실험에 적용된 응력확대계수 범위 ΔK의 계산식은 다음과 같다.[7)]

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

$$\text{단}, \alpha = a/W (a/W \geq 0.2)$$

여기서, a는 하중중심에서의 균열길이, W는 하중중심에서의 시험편 길이, B는 시험편의 두께이고, ΔP(P max - P min)는 하중변위이다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열속도

Fig. 4~5는 SAE5155강의 쇼트피닝 유무에 따라 상온과 부식 환경에서의 피로균열성장 속도비(da/dN)와 응력확대계수(⊿K)의 관계를 도시하였다. 피

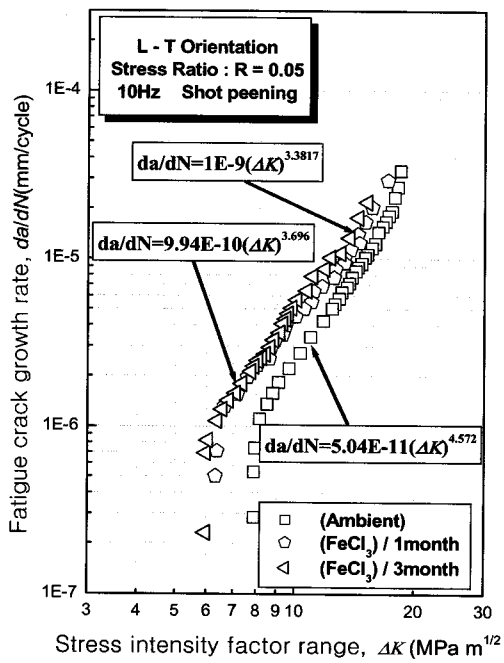


Fig. 4 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of shot peened material

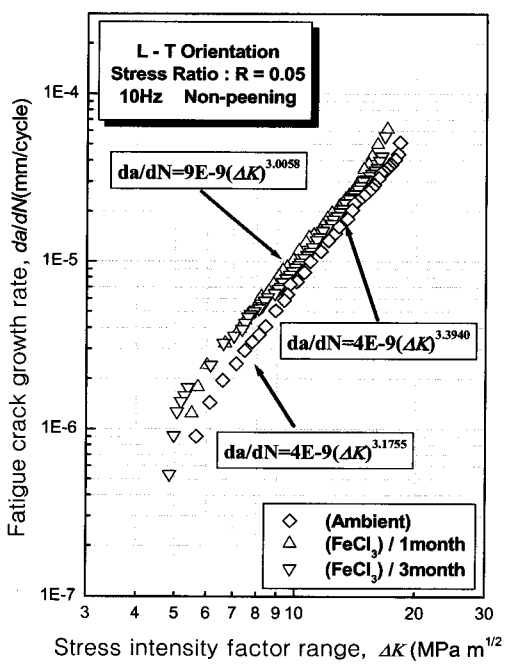


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of non-peened material

로균열 속도비에 있어서는 전반적으로 쇼트피닝재가 언피닝재보다 낮은 속도를 나타내고 있다. 이는 앞선 연구에서 언급했듯이 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 시험편 표면부의 압축잔류응력이 피로균열 진전과정에서 균열선단 소성영역내의 소성변형에 대한 구속력으로 작용하여 피로균열속도가 낮은 것으로 판단된다.

부식 환경에 있어서는 두 가지 종류의 시험편 모두 침지기간이 길어짐에 따라 피로균열속도비도 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 두 시험편 모두 침지기간 초기에 재료 표면에 이상적인 위치에 부식피트가 생성된다. 또한 시간이 지남에 따라 이 작은 부식피트가 성장 및 합쳐짐으로써 염소이온의 농축화가 쉽게 이루어짐으로 해서 피로균열진전동안 부식 환경에서의 재료가 더욱 빠른 균열속도를 나타낸 것으로 판단된다.[8)]

피로균열 성장 속도비와 응력확대계수 값을 양대수 그래프로 표시하는 Paris 공식[9)] da/dN=C(⊿K)m에 따른 각각의 조건에 대한 식을 Table 3에 나타내었다. 피로균열진전지수(m)는 상온에서보다 부식환경에서 낮은 수치를 나타내고 있으며, 재료상수(C)는 정반대의 양상을 나타내고 있다.

Table 3 Paris linear regime of material in several conditions

Material	Shot peening	Non-peening
Ambient	$5.04E\text{-}11(\Delta K)^{4.572}$	$4E\text{-}9(\Delta K)^{3.1755}$
$FeCl_3$ 1month	$1E\text{-}9(\Delta K)^{3.3817}$	$4E\text{-}9(\Delta K)^{3.0058}$
$FeCl_3$ 3month	$9.94E\text{-}10(\Delta K)^{3.696}$	$9E\text{-}9(\Delta K)^{3.3940}$

Fig. 6은 임의의 ⊿K(⊿K=14MPa$\sqrt{m}$, 8MPa$\sqrt{m}$)에서의 피로균열성장 속도비를 도시화한 것이다. 고응력확대계수 구간(⊿K=14MPa$\sqrt{m}$) 보다 저응력확대계수 구간(⊿K=8MPa$\sqrt{m}$)에서 침지기간에 따른 균열속도가 약간 증가하고 있는 것을 알 수가 있다. 이는 기계적 손상과 화학적 손상이 동시에 균열선단에 이루어짐으로 인해서 나타난 결과라고 판단된다. 즉, 응력확대계수구간에 있어서는 낮은 응력확대계수구간에서 오히려 피로균열진전에 대한 부식의 영향이 큰 것으로 나타났다.

3.2 피로균열진전길이와 사이클 수

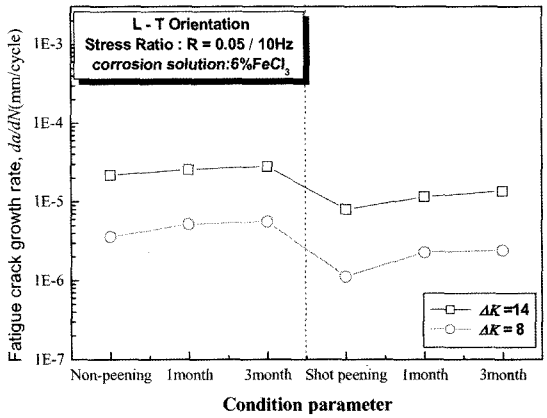


Fig. 6 Correlation between da/dN and condition parameter of material

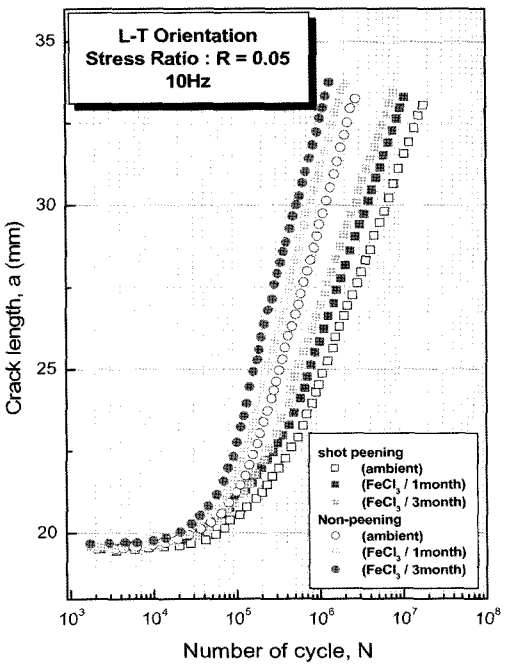


Fig. 7 Relation between crack length and number of cycle

Fig. 7은 응력비 R=0.05, 주파수 10Hz에서 피로균열진전길이와 사이클 수와의 관계를 나타낸 것이다.

균열길이 30mm지점에서의 사이클 수를 비교해 보면 먼저 쇼트피닝재의 상온에서 6.53×10^6Cycle, 1개월 침지에서 3.62×10^6Cycle, 3개월 침지에서 2.55×10^6Cycle로 나타났고, 언피닝재의 경우는 상온에서 1.18×10^6Cycle, 1개월 침지에서 7.48×10^5Cycle,

3개월 침지에서 5.41×10^5Cycle로 나타났다.

각 조건에서의 피로수명은 쇼트피닝재가 언피닝재보다 상온에서는 453%, 1개월 침지에서는 383%, 3개월 침지에서는 371% 증가되었다. 따라서 침지기간에 따라 쇼트피닝의 효과가 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 침지기간동안 금속의 양극용해로 인해 초기에 시험편 표면에 형성된 압축잔류응력의 균열 진전에 대한 구속력이 떨어짐으로 해서 낮은 피로수명이 나타난 것으로 판단된다.

3.3 부식전위 및 무게감소량의 변화

Fig. 8은 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편의 침지시간에 따른 부식전위의 변화양상을 나타내고 있다. 부식전위의 측정은 부식용액에 시험편을 10분 동안 침지시켜 변동된 전위를 안정화한 후에 측정하였다. 침지초반에는 쇼트피닝재가 언피닝재보다 부식전위가 비한방향(-측방향)으로 형성되어 있는 것을 알 수가 있다. 이는 초반에 쇼트피닝재가 쇼트볼 충돌로 인해 표면이 언피닝재보다 거칠어져 있어 부식 가속화의 요인으로 작용한 것으로 판단된다.[10] 그러나 시간이 경과함에 따라 언피닝재는 비한방향으로 쇼트피닝재는 귀한방향(+측방향)으로 이동하는 양상을 보여주고 있다. 이는 보호피막의 생성과 성장으로 발생하는 성장응력과 기존에 쇼트피닝 가공으로 생성된 압축잔류응력과의 상호작용에 의해 보호피막의 형성시간이 길어져 외부 부식환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로

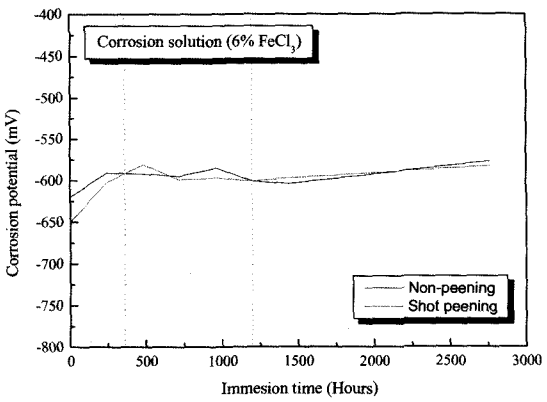


Fig. 8 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 6% $FeCl_3$

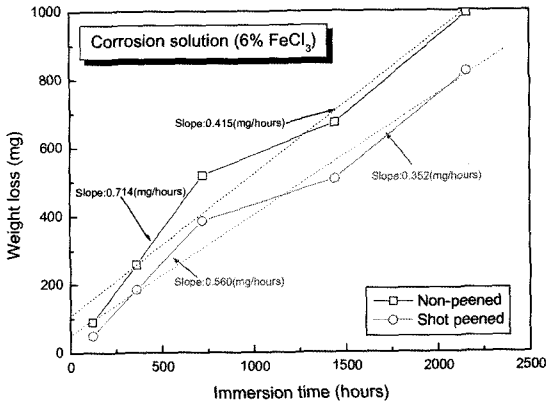


Fig. 9 Weight loss versus immersion time of specimens in 6% $FeCl_3$

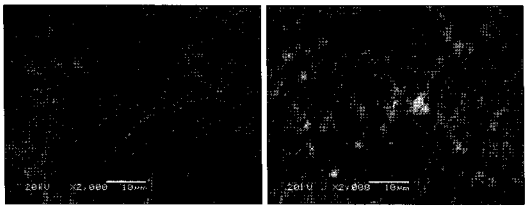
판단된다. 즉 부식 환경에서는 부식이 진행됨에 따라 보호피막의 생성 및 성장하여 보호피막이 탈락하게 된다. 이 보호피막을 탈락하게 하는 힘이 성장응력으로서 성장응력이 (+)측 응력이면 압축잔류응력은 (-)측 응력으로서 응력이완에 의해 보호피막의 형성 시간이 길어져 외부 부식 환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로 판단된다.

Fig. 9는 5일, 15일, 30일, 60일, 90일 동안 침지시켜 무게감소량을 측정한 결과를 나타낸 것이다. 무게감소량은 침지 전에 중량을 측정하고 부식생성물을 완전히 제거한 후에 측정을 하였다. 무게감소량은 전반적으로 언피닝재가 쇼트피닝재보다 높은 감소량을 나타내고 있다. 또한 30일(720시간)과 60일(1440시간)사이에서의 무게감소량이 초반에 비해 낮은 증가량을 나타내고 있는데 이는 부식진행에 따라 생성된 보호피막에 의해 외부의 부식환경에 대한 금속의 용해가 감소되어 나타난 것으로 판단된다.[11]

시간에 따른 무게비율을 보면 30일 동안 침지시킨 후에는 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 약 1.2배 (0.714mg/hours→0.560mg/hours)정도 높았으나 90일 동안 침지시킨 후에는 약 1.17배(0.415mg/hours→0.352mg/hours)로 점차 그 차이가 좁혀지고 있음을 알 수가 있다.

3.4 파단면 특성

Fig. 10은 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편의 30



(a) Shot peening (b) Non-peening
(ΔK=14MPa$\sqrt{m}$)

(c) Shot peening (d) Non-peening
(ΔK=10MPa$\sqrt{m}$)

Fig. 10 Fracture surface of different crack propagation stage in 6% $FeCl_3$ solution

일 동안 침지 후 피로균열진전특성을 ΔK 감소방식으로 시험하는 동안 각 응력확대계수에서의 미시적 파면양상을 주사식 전자현미경(SEM)으로 나타낸 것이다.

파단면에 있어서 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편보다 적은 양의 부식피트와 부식생성물이 생성되어 있는 것을 볼 수가 있다. 또한 각 응력확대계수에 따른 파면에 있어서는 고응력확대계수 구간보다 저응력확대계수 구간에서 더 많은 양의 부식피트와 미소균열이 많이 생성되어 있는 것을 알 수가 있다.

따라서 응력확대계수가 작을수록 부식의 영향이 크다고 할 수 있으며, 부식 환경에서도 쇼트피닝의 가공에 의해 생성된 압축잔류응력이 피로균열진전의 억제효과가 있는 것으로 판단되었다.

4. 결 론

SAE 5155강의 쇼트피닝 가공을 통해 형성된 압축잔류응력이 상온과 부식 환경에서의 피로균열진전거동에 미치는 영향에 대해 실험을 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 피로균열진전속도에 있어서는 전반적으로 쇼트피닝재가 낮은 균열진전속도를 나타내었으며, 부식 환경에서는 두 시험편 모두 피로균열진전에 부식의 영향으로 인해 빠른 균열속도를 나타내었다.
2) 부식 환경의 피로수명에 있어서도 압축잔류응력의 영향으로 인해 쇼트피닝재가 언피닝재보다 증가하는 양상을 나타내었다. 그러나 침지기간이 길어질수록 압축잔류응력층의 용해로 인해 피로균열진전의 구속력이 떨어지는 것을 알 수가 있었다.
3) 부식전위의 변화에 있어서는 쇼트피닝재가 언피닝재보다 귀한 방향의 전위를 형성하였다. 이는 보호피막의 성장에 따라 발생하는 성장응력과 기존에 쇼트피닝 가공으로 형성된 압축잔류응력과의 상호작용에 의해 외부 부식 환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로 판단된다.
4) 파단면 관찰에 있어서는 쇼트피닝재가 언피닝재보다 적은 부식피트, 부식생성물이 형성되어 있었고, 각 응력확대계수에서는 응력확대계수가 작을수록 부식의 영향을 많이 받고 있음을 알 수가 있다.

References

1) K. D. Park, J. H. Kim, H. K. Yoon and W. J. Park, "A Study on Fatigue Crack Propagation Behavior of Pressure Vessel Steel SA516/70 at High Temperature," KCORE 15-2-456, pp.105-110, 2001.
2) K. D. Park and C. K. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses on Fatigue Strength in DIN50CrV4-SAE9254 Steel," KCORE, Vol.15, No.3, pp.94-100, 2001.
3) W. F. Brown and J. E. Strawley, "Plane Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," ASTM STP 410, 1996.
4) D. A. Lopez, W. H. Schreinerb, S. R. de Sancheza and S. N. Simisona, "The Influence of Carbon Steel Microstructure on Corrosion Layers An XPS and SEM Characteristics," Applied Surface Science, Vol.207, pp.69-85, 2003.
5) K. D. Park, "A Study on the Effect of Compressive Residual Stress on Fatigue Crack Propagation Behavior of the Shot-peened

Spring Steel," Transactions of KSAE, Vol.11, No.4, pp.117-124, 2003.
6) K. D. Park and C. G. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue Life of Vehicle Spring Steel," Transactions of KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
7) ASTM : E647-93, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, 1993.
8) K. Makhlouf, H. Sidhom, I. Triguia and C. Braham, "Corrosion Fatigue Crack Propagation of a Duplex Stainless Steel X6Cr Ni Mo Cu 25-6 in Air and in Artificial Sea Water," International Journal of Fatigue, Vol.25, pp.167-179, 2003.
9) Y. B. Lee, H. K. Kim and J. S. Jung, Fundamentals of Fatigue Analysis, Chungmun-gak, pp.99-125, 1999.
10) K. D. Park and J. P. An, "The Effect of Compressive Residual Stress of Spring Steel for Vehicle on Corrosion," Transactions of KSAE, Vol.13, No.1, pp.159-165, 2005.
11) D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.31-34, 1995.