

압축잔류응력을 부여한 스프링강의 부식피로 수명평가

박경동* · 기우태 · 신영진

부경대학교 기계공학부

An Evaluation on Corrosion Fatigue Life of Spring Steel by Compressive Residual Stress

Keyungdong Park* · Wootae Ki · Yeongjin Sin

Department of mechanical Engineering, Pukyong National University, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea
(Received 10 January 2006 / Accepted 19 July 2006)

Abstract : In this study, the influence of compressive residual stress and corrosive condition for corrosion fatigue crack was investigated, after immersing in 3.5%NaCl, 10%HNO₃+3%HF, 6%FeCl₃. The immersion period was performed for 90days. The fatigue characterization of a spring steel with processed shot peening were performed by considering the several corrosion environments in the range of stress ratio of 0.05 by means of opening mode displacement. By using the methods mentioned above, the following conclusions have been drawn: The fatigue life shows more improvement in the shot peened material than that in the un peened material. And the fatigue life shows improvement in ambient than in corrosion conditions. Threshold stress intensity factor range of the shot peened materials has higher than of the un peened materials. And the threshold stress intensity factor range was decreased in corrosion environments over ambient.

Key words : Compressive residual stress(압축잔류응력), Corrosive condition(부식조건), Corrosion fatigue crack(부식피로균열), Fatigue life(피로수명), The threshold stress intensity factor range(하한계 응력확대계수)

1. 서론

각종 기계부품이나 구조물의 성능에 미치는 잔류응력은 분포형태에 따라 성능을 강화시키거나 응력집중으로 약화시킬 수 있다. 즉 작용응력과 잔류응력의 중첩을 통해 응력집중을 감소시킴으로서 부품의 성능을 개선시킬 수 있다.¹⁾ 이처럼 잔류응력들은 부품의 수명이나 파손에 중요한 영향을 미친다.^{2,3)} 따라서 표면부에 압축잔류응력을 부여하여 부품의 수명을 연장하기 위한 방법으로 쇼트피닝 가공법이 널리 쓰이고 있다. 쇼트피닝 가공법은 주로 밸브 스프링, 판스프링, 클러치, 커넥팅 로드, 크랭크 축, 코

일 스프링과 같은 각종 자동차 부품의 피로수명을 향상시키는데 주로 사용을 한다.⁴⁾ 이는 쇼트피닝 가공에 의해 금속 표면부에 형성된 압축잔류응력이 반복하중을 받는 금속표면부에 발생하는 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열의 개시를 지연시켜 주고 균열의 안정성장을 지연시켜 피로수명을 향상시키기 때문이다.^{5,6)} 따라서 기계부품의 피로강도에 미치는 쇼트피닝의 영향에 대해서 여러 가지 실험들이 이루어졌다.⁷⁾ 그러나 부식 환경에서의 부식생성기구와 쇼트피닝 가공을 통해 표면에 형성된 압축잔류응력이 부식피로균열진전에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 규명은 아직 미비한 실정이다.

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

따라서 본 논문에서는 주로 자동차 현가장치나 스프링 재료로 사용되고 있는 스프링강에 쇼트피닝 가공을 실시하여 각종 부식 환경에서 부식피로균열 성장거동을 연구하여 압축잔류응력과 부식생성기구의 관계를 규명하고자 한다. 이를 위해 세 가지 부식용액(3.5%NaCl, 10%HNO₃+3%HF, 6%FeCl₃)에서 90일 동안 침지시킨 후 피로균열진전실험을 실시하여 각종 부식액에서의 쇼트피닝의 영향, 부식 형태와 압축잔류응력과의 관계를 분석하여 부식피로수명 평가 자료로 사용함으로써 각종 부품의 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 시험편 및 쇼트피닝

본 연구에 사용된 재료는 자동차 스프링재료로 사용되고 있는 스프링강이며, 화학적 성분을 Table 1에 나타내었고, 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다.

Table 1 Chemical compositions of specimen [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr
Spring steel	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88

Table 2 Mechanical properties of specimen

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (HrC)	Elongation (%)
1226	1079	47	9

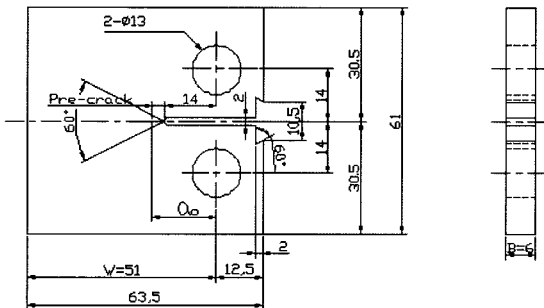


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

피로균열진전거동을 관찰하기 위한 CT시험편은 두께를 6mm로 하였고 시험편의 채취는 열간 압연된 플랫바 상태에서 압연방향과 균열의 전파방향이

직각이 되도록 채취하였다. 각 부 치수는 ASTM E647-93의 기준에 따라 Fig. 1과 같으며, 외형가공은 밀링으로, 노치홈은 와이어 커팅 머신에 의하여 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈반지름은 0.1mm가 되게 가공하였다. 그 후 엔진밸브 스프링 제조용 쇼트피닝기를 사용하여 Table 3과 같은 조건하에서 볼의 투사속도 57%, 70%, 83%, 96%로 압축잔류 응력을 부여한 결과 Fig. 2와 같이 최적의 투사속도 70%, 즉 2200rpm에서 표면으로부터 110 μ m깊이에 730MPa의 최대 압축잔류응력이 형성되었음을 X-선 잔류응력 측정기(RIGAKU-MSF2M)로 측정하였다.^{8,9)}

Table 3 Conditions of shot peening

Impeller diameter (mm)	Shot velocity (rpm)	Shot ball diameter (mm)	Arc height (mm)	Cover-age (%)
490	2200	0.8	0.375	95

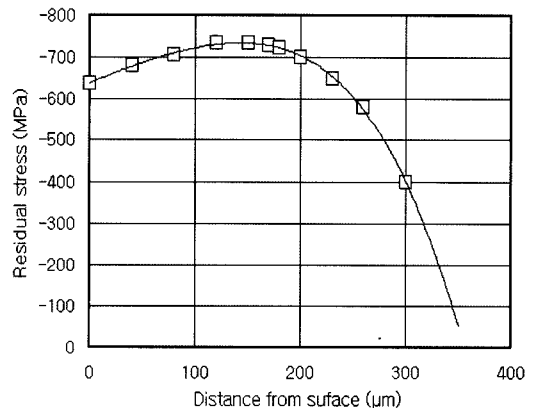


Fig. 2 Compressive residual stress distribution produced by shot peening

2.2 실험장치 및 방법

부식 환경에 따른 피로균열진전거동을 관찰하기 위해 용존산소를 제거하지 않은 세 가지 부식용액(3.5%NaCl, 10%HNO₃+3%HF, 6%FeCl₃)을 1ℓ 용량의 특수용기에 담근 후 언피닝 시험편과 쇼트피닝 시험편을 각각 침지시켰다. 시험편은 각각 세 개씩 침지시켜 각 시험편이 겹치지 않도록 고정시켜 90일 동안 침지시켜 평균값으로 결과를 나타내었다.

Fig. 3은 본 연구에 사용된 피로시험기(INSTRON

8821S)를 나타내고 있다. 실험은 서보전기 유압식 피로 시험기를 이용하여 하중감소 제어방식으로 주파수는 10Hz, 응력비 R=0.05으로 하였고, 피로균열 길이측정은 크립게이지에 의한 컴플라이언스법에 의해 측정하였다.

피로실험은 ASTM E647-93에 따라 ΔK 감소법으로 하여 피로균열이 정지될 때까지 실험하였다.

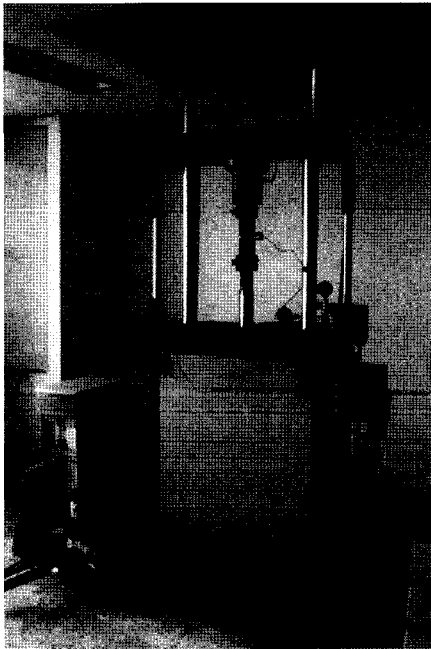


Fig. 3 Apparatus of fatigue test machine (INSTRON 8821S)

실험해석을 하기 위한 응력확대계수 ΔK 는

$$\Delta K = \begin{cases} K_{\max} - K_{\min} & (K_{\min} > 0) \\ K_{\max} & (K_{\min} \leq 0) \end{cases} \quad (1)$$

및 응력비

$$R = K_{\min} / K_{\max} \quad (2)$$

의 함수가 된다. 여기서 R의 영향을 제외하면 특성의 ΔK 의 범위에서 다음과 같은 함수형이 실험적으로 얻어지고 있는데, 그것은 Paris 법칙인¹⁰⁾

$$da / dN = C (\Delta K)^m \quad (3)$$

으로 나타나고, 양대수 선도상에서 직선적으로 변

한다. 여기서 C와 m은 재료상수로서 그 값은 동일 재료, 동일환경 구조물 등의 균열진전속도 및 수명을 예측할 수 있게 한다.¹¹⁾

3. 실험결과 및 고찰

3.1 피로균열진전특성

Fig. 4는 쇼트피닝재와 언피닝재를 각각의 부식 환경에서 피로시험을 실시하여 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수(ΔK)를 양대수 직선상에 나누어 나타낸 것이다. 각각의 부식 환경에서도 쇼트피닝재가 언피닝재보다 균열속도가 낮은 경향을 보이고 있다. 이는 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력이 부식 환경에서도 균열초기뿐만 아니라 균열진전과정에 있어서도 균열선단의 구속력으로 작용하여 피로균열진전속도의 지연효과가 있음을 알 수가 있다.

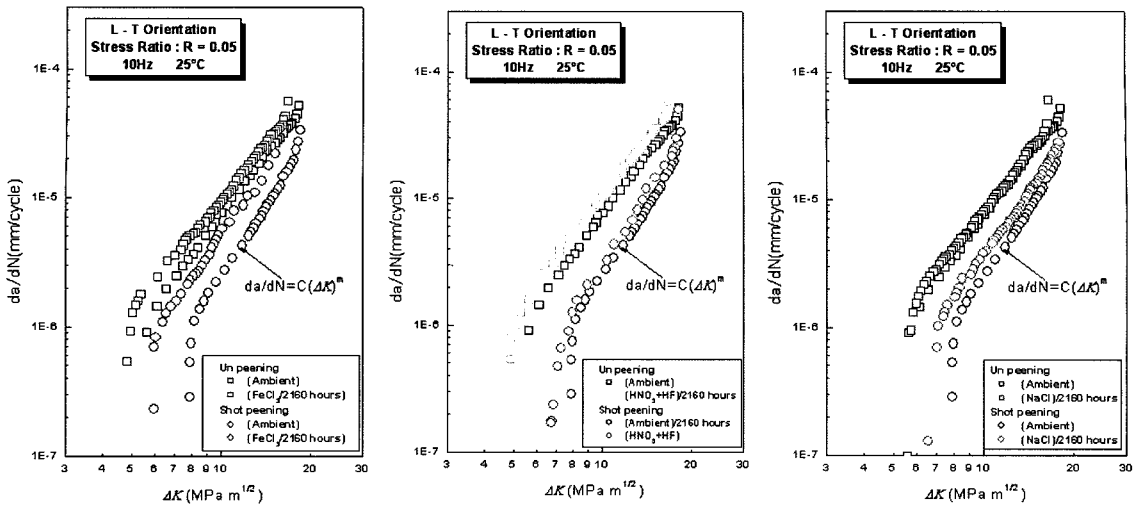
6% FeCl₃ 수용액의 경우 부식 환경에서의 쇼트피닝재와 언피닝재의 균열진전속도의 차이가 다른 수용액에 비해 크게 나지 않은 것을 알 수가 있다.

부식형태 중에서 공식에서는 쇼트피닝의 효과가 다소 떨어지고 있음을 알 수가 있다.

이는 전면부식보다는 국부적인 공식이 진행됨에 따라 Cl⁻이온에 의해 부식피트가 발생하여 결과적으로는 응력집중현상이 발생할 수 있다. 이러한 응력집중은 초기에 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 균일한 압축잔류응력층의 불균일한 형성을 유도함으로써 부식의 진행을 활성화시킨 것으로 판단된다.

반면에 10% HNO₃ + 3% HF 수용액에서는 쇼트피닝재의 경우 언피닝재와는 달리 3.5% NaCl 보다 피로균열진전동안 다소 나은 부식피로균열저항성을 나타내고 있다. 일반적으로는 입계부식에서는 입계 부분에 가까이 있던 크롬원자와 탄소원자와의 결합으로 입계에서의 탄화물이 석출된다.¹²⁾ 그러나 쇼트피닝 가공을 실시하면 입계에서의 탄화물 석출이 저지되어 상대적으로 언피닝재에 비해 부식에 대한 저항성이 높은 것으로 판단된다. 따라서 입계부식에서의 쇼트피닝 처리는 부식피로균열에 대한 저항성을 높여주는 것으로 판단된다.

Table 4는 응력확대계수 $\Delta K=10\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 일 때 언피닝재와 쇼트피닝재에 대한 피로균열진전속도를 수



(a) 6% FeCl₃ corrosion solution (b) 10% HNO₃ + 3% HF corrosion solution (c) 3.5% NaCl corrosion solution

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

Table 4 Relation between fatigue crack growth rate and corrosion condition

Corrosion condition	Fatigue crack growth rate(da/dN)	
	Un peening	Shot peening
Ambient	7.24E-6	2.69E-6
6% FeCl ₃	9.38E-6	5.48E-6
10% HNO ₃ +3% HF	1.01E-5	3.04E-6
3.5% NaCl	8.25E-6	3.79E-6

치로 비교한 것이다. 세 가지 부식용액 중에서 6%FeCl₃ 수용액에서 균열속도가 가장 빠른 것을 알 수가 있다. 이는 균열선단에서의 화학적 손상 즉 Cl⁻ 이온에 의한 국부적인 파괴와 더불어 기계적인 손상이 중첩됨으로써 균열진전의 가속화가 일어난 것으로 판단된다.

Fig. 5는 상온 및 여러 가지 부식 환경과 하한계 응력확대계수(ΔK_{th})와의 관계를 나타낸 것이다.

상온보다 부식 환경에서 하한계 응력확대계수가 감소되고 있음을 알 수 있다. 이는 낮은 주파수와 응력확대계수범위에서 균열선단에서의 전기화학적 작용의 영향으로 인해 부분적인 부식피트가 발생 및 성장으로 인해 낮은 하한계 응력확대계수 값을 나타낸 것으로 판단된다. 따라서 하한계 응력확대계수는 시험편의 환경과 같은 인자의 영향을 많이 받는 것으로 판단된다.

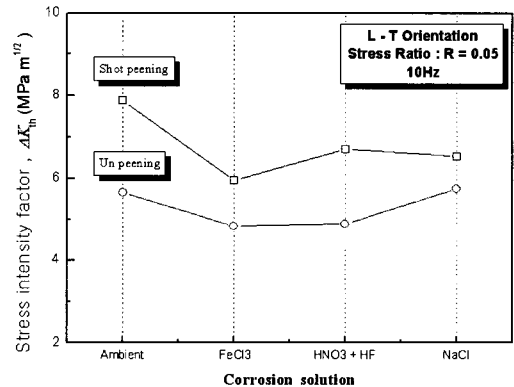


Fig. 5 Relation between threshold stress intensity factor and corrosion solution

3.2 부식조건에 따른 재료상수 C, m의 관계

Fig. 6~7은 세 가지 부식 수용액에서의 하한계 응력확대계수(ΔK_{th})와 피로균열진전지수(m), 재료상수(C)와의 관계를 나타낸 것이다.

먼저 전반적으로 언피닝재가 쇼트피닝재의 비해 낮은 피로균열진전지수 값을 나타내고 있다. 또한 상온에 비해 부식 환경에서는 낮은 피로균열진전지수 값을 나타내고 있으며 하한계 응력확대계수와의 비례적인 관계를 나타내고 있었다. 반면에 재료상수는 하한계 응력확대계수 값이 낮을수록 높은 값을 나타내어 피로균열진전지수와 재료상수는 서로 반대의 경향이 나타났다.

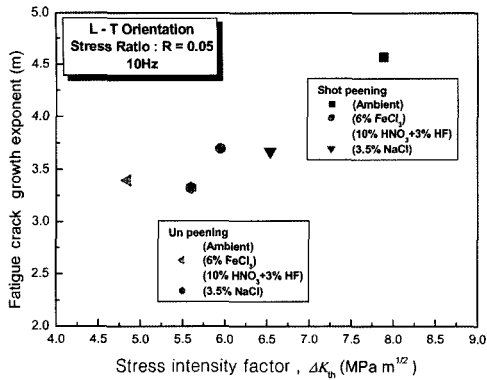


Fig. 6 Relation between fatigue crack growth exponent m and threshold stress intensity factor ΔK_{th}

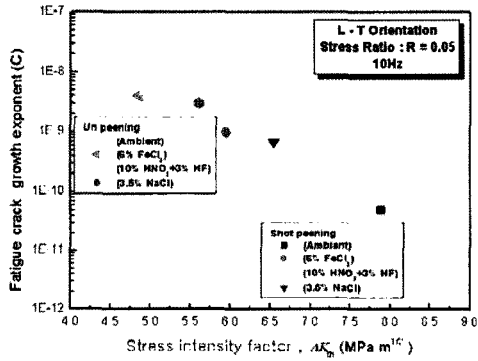


Fig. 7 Relation between material constant C and threshold stress intensity factor ΔK_{th}

3.3 피로균열진전길이와 사이클 수

Fig. 8은 상온과 여러 가지 부식 환경에서의 피로 균열진전길이와 사이클 수와의 관계를 나타낸 것이다. Table 5는 균열길이 30mm 지점을 기준으로 하여 수치로 비교한 것이다. 각 조건에서의 사이클 수는 쇼트피닝재가 언피닝재보다 상온에서는 453%, 6% FeCl₃ 수용액에서는 371%, 10% HNO₃+3% HF 수용액에서는 502%, 3.5% NaCl 수용액에서는 270%가 증가되었다.

따라서 상온에 비해 부식 환경에서는 피로수명이 감소되는 것을 알 수가 있다. 또한 부식 수용액 중에서 10% HNO₃+3% HF 수용액에서 즉 부식 형태 중에서 입계부식에서 쇼트피닝 효과가 크게 나타나고 있는 것을 알 수가 있다.

3.4 부식 환경에서의 쇼트피닝의 효과

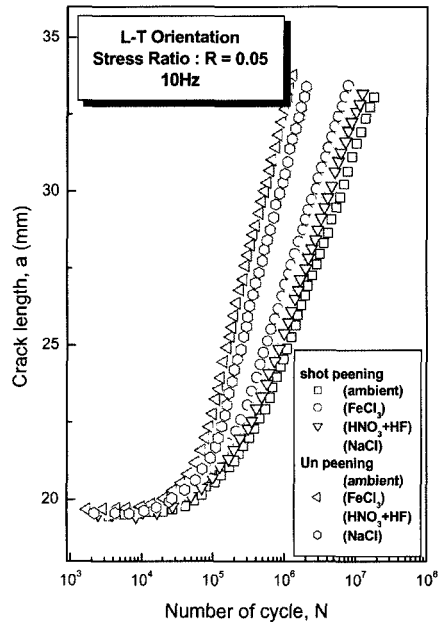


Fig. 8 Relation between crack length and number of cycle

Table 5 Number cycle at the crack length of 30mm

Corrosion solution	un peening	shot peening
Ambient	1.18×10^6	6.53×10^6
6% FeCl ₃	5.41×10^5	2.55×10^6
10% HNO ₃ +3% HF	7.34×10^5	4.42×10^6
3.5% NaCl	8.94×10^5	3.31×10^6

상온과 달리 부식 환경에서의 쇼트피닝의 효과는 쇼트피닝 가공 시 재료의 표면에 형성된 압축잔류 응력층의 영향에 따른 것으로 보인다. 일반적으로 재료의 표면에 현저히 다른 응력상태가 발생할 때 재료에는 상이한 응력들이 공존하게 되며, 응력이 많이 걸린 부분은 양극으로 작용하여 국부전지에 의한 부식의 진행이 활성화 된다.^{13,14} 그러나 쇼트피닝 가공의 경우 초기에 재료 표면에 형성된 균일한 압축잔류응력층이 부식진행에 따라 생성된 성장응력과의 상호작용에 의해 외부환경에 대한 모재의 보호층 역할을 한 것으로 판단된다.

Fig. 9에 나타낸 것처럼 부식 환경에서는 부식이 진행됨에 따라 보호피막이 생성 및 성장하여 보호피막이 탈락하게 된다. 이 보호피막을 탈락하게 하는 힘이 성장응력으로서 성장응력이 (+)축 응력이면 압축잔류응력은 (-)축 응력으로서 응력이완에 의해

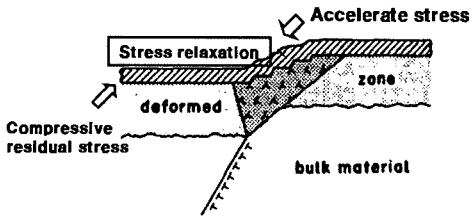


Fig. 9 Schematic diagram of stress decrease by corrosion

보호피막의 형성시간이 길어져 외부 부식 환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로 판단된다.

3.5 각 수용액에서의 부식표면

Fig. 10은 세 가지 수용액에서의 90일 침지 후 쇼트피닝재와 언피닝재의 부식표면을 SEM 촬영한 사진을 나타낸 것이다. 전반적으로 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 부식이 많이 진행된 모습의 표면을 보여주고 있는 것을 알 수가 있다. Fig. 10 (a),(b)의 경우 전형적인 부식형태 중에서 공식진행에 따른

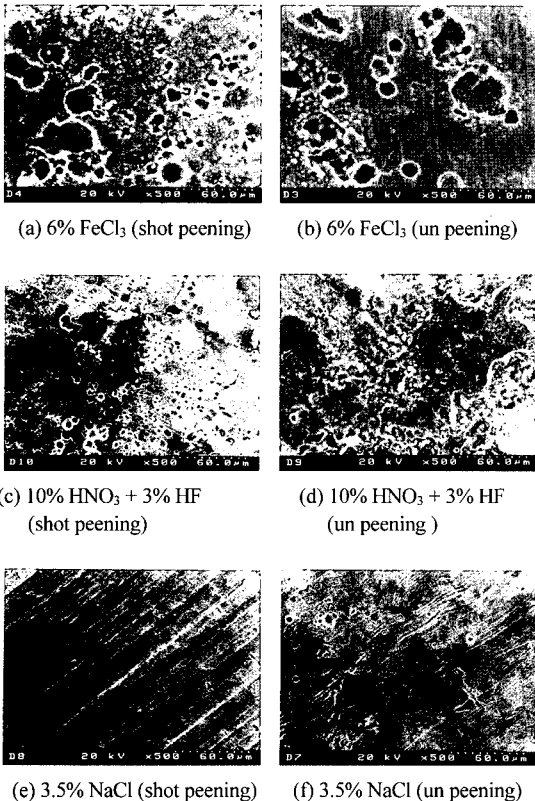


Fig. 10 SEM photographs of corroded surface

표면의 양상을 나타내고 있으며, 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 혹 모양의 부식피트 깊이와 크기면에서 큰 것을 알 수가 있다. Fig. 10 (c), (d)의 경우에는 언피닝재가 쇼트피닝재에 비해 표면이 다소 거칠어져 있는 것을 볼 수가 있다.

4. 결론

압축잔류응력을 부여한 스프링강의 세 가지 부식액에서 피로균열진전거동에 미치는 부식의 영향과 부식 형태에 따른 피로특성에 대한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 이는 차량용 현가장치의 부식설계에 응용하고자 한다.

- 1) 각 부식수용액에서의 피로균열진전속도는 전반적으로 쇼트피닝재가 언피닝재에 비해 낮은 피로균열속도를 나타내었다. 이는 압축잔류응력이 균열진전과정에서 균열전단의 구속력으로 작용하여 피로균열진전속도 지연효과가 나타난 것으로 판단된다.
- 2) 하한계 응력확대계수에는 상온보다 부식 환경에서 낮은 값을 보였다. 이는 낮은 주파수와 응력확대계수범위에서는 균열전단에서의 전기화학적 작용으로 부분적인 부식피트 발생 및 성장으로 낮은 값을 나타낸 것으로 판단된다.
- 3) 세 가지 부식액 중에서 10% HNO_3 +3% HF 수용액에서 가장 높은 피로수명을 나타내었고, 언피닝재는 3.5% NaCl 수용액에서 가장 낮은 값을 나타내어 부식형태 중에서 입계부식에서 쇼트피닝의 효과가 크게 나타났다.
- 4) 부식 환경에서는 쇼트피닝 가공 시 재료에 형성된 압축잔류응력이 부식의 진행에 따라 생성된 성장응력과의 상호작용에 의해 보호피막의 생성시간이 길어져 언피닝재의 비해 부식에 대해 저항성이 높은 것으로 나타났다.

References

- 1) W. M. Jr. Baldwin, "Residual Stresses in Metals," Marburg Lecture, Proceeding, ASTM, Vol.49, 1949.
- 2) D. E. Bray and R. K. Stanley, Nondestructive Evaluation, CRC Press, New York, 1997.
- 3) D. J. Wulpi, Understanding How Metals Fail,

- ASM Metals Park. OH, 1985.
- 4) S. Tekeli, "Enhancement of Fatigue Strength of SAE 9245 Steel by Shot Peening," *Materials Letters* Vol.57, pp.604-608, 2002.
 - 5) S. G. Jung and S. H. Lee, *A Guide of Shot peening Proceeding*, SeHwa Pub, pp.6-12, 2001.
 - 6) S. K. Cheong, S. H. Lee and S. C. Chung, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *KSME*, Vol.25, No.10, pp.1590-1596, 2001.
 - 7) 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, 2003.
 - 8) ASTM, "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress," ASTM E1426-94, pp.932-935. 1994.
 - 9) ASTM, "Standard Test Method for Verifying The Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement," ASTM E915-90, pp.691-693, 1990.
 - 10) Y. B. Lee, H. K. Kim and J. S. Jung, *Fundamentals of Fatigue Analysis*, Chungmunkgak, Seoul, Korea, pp.99-125, 1999.
 - 11) C. M. Verpoort and C. Gerdes, "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, 1989.
 - 12) D. A. Jones, *Principles and Prevention of Corrosion*, 2nd Edition, Prentice Hall, New Jersey, pp.31-34. 1995.
 - 13) Y. C. Lin and S. C. Chen, "Effect of Residual Stress on Thermal Fatigue in a Type 420 Martensitic Stainless Steel Weldment," *Journal of Materials Processing Technology*, 2003.
 - 14) M. G. Fontana, *Corrosion Engineering*, 3rd Edition, McGraw-Hill, New York, 1986.