

자동차 현가장치재의 부식피로수명에 따른 압축잔류응력의 영향

기우태¹⁾ · 박성모²⁾ · 문광석³⁾ · 박경동^{*4)}

¹⁾부경대학교 대학원 기계공학부 · ²⁾부경대학교 대학원 컴퓨터공학과 · ³⁾부경대학교 전자공학부 · ⁴⁾부경대학교 기계공학부

The Effect of Compressive Residual Stress according to Corrosion Fatigue Life of Automobile Suspension Material

Woo-Tae Ki¹⁾ · Sung-Mo Park²⁾ · Kwang-Seok Moon³⁾ · Kyeong-dong Park^{*4)}

¹⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

²⁾Department of Computer Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

³⁾Department of Electronics Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

⁴⁾Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 9 May 2007 / Accepted 15 April 2008)

Abstract : A study of new materials that are light-weight, high in strength has become vital to the machinery of auto industries. But then, there are a lot of problems with developing such materials that require expensive tools, and a great deal of time and effort. Therefore, the improvement of fatigue strength and fatigue life are mainly focused on by adopting residual stress. And Influence of corrosive condition for corrosion fatigue crack was investigated, after immersing in 3.5%NaCl, 10% HNO₃+3.5%HF, 6%FeCl₃. The immersion period was performed for 365days. The compressive residual stress was imposed on the surface according to each shot velocity based on shot peening, which is the method of improving fatigue life and strength. Fatigue life shows more improvement in the shot peened material than in the un peened material in corrosion conditions. The threshold stress intensity factor range was decreased in corrosion environments over ambient. Compressive residual stress of surface on the Shot-peen processed operate resistance force of fatigue crack propagation. The fatigue crack growth rate of the Shot-peened material was lower than that of the un peened material. Also m, fatigue crack growth exponent and number of cycle of the shot peened material was higher than that of the un peened material. That is concluded from effect of da/dN.

Key words : Compressive residual stress(압축잔류응력), Shot peening(쇼트피닝), Fatigue life(피로수명), Fatigue crack growth rate(피로균열진전속도), Threshold stress intensity factor(하한계 응력확대계수)

Nomenclature

da/dN : fatigue crack growth rate
△K : stress intensity factor range
△K_{th} : threshold stress intensity factor
R : stress ratio

1. 서론

부식 환경에서의 균열의 발생과 진전에는 상온에 서와는 달리 많은 복합적인 요인이 있다. 많은 철강 재료의 경우에는 부식과정에 있어서 금속의 용해로 인해 상온에서보다 부식 환경에서 균열속도가 더 빨리 진전이 된다.¹⁾ 최근 환경오염이 심각해 해수환경의 경우 일반해수와 다른 질산화물이나 황산화물 등 각종 오염물질이 많이 배출되고 있고, 산성비와

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

염화나트륨의 사용량이 많아 각종 기계 자동차 부품이나 선박 등 각종 해양구조물의 강도를 저하시키는 원인이 되고 있다.

구조물 중의 결함은 반복하중이나 부식성 환경, 고온 환경에서 안정하게 성장하여 관통누설이나 급속파단에 이르는 경우가 있고, 파괴역학은 취성과 파괴나 연성파괴에서 불안정 파괴뿐만 아니라 이와같은 피로파괴나 환경파괴에서 보여지는 균열의 안정 성장의 특성을 해석·평가하는 유력한 방법으로 반복피로 균열의 성장특성, 영향 인자 등에 대한 연구가 요구되고 있다.

재료의 피로파괴는 환경에 따른 강도, 부식과 더불어 재료의 수명을 단축하고 구조물의 내구연한을 결정짓는 가장 중요한 사항으로써 피로수명 평가의 필요성이 증대되고 있다. 따라서 부품에 사용되는 재료, 특히 철강재는 고강도화 되어야 한다는 것이 필수적인 사항이 되고 있다. 그러나 고강도화 재료에서 피로파괴의 원인이 되는 내부의 결함과 환경 부식이 존재하지 않아야 하는 것이 필수적인 사항으로 지적되고 있다. 재료내부의 결함은 금속학적인 분야에서 활발히 연구되고 있으며 금속표면의 결함을 제거하고 표면에 압축잔류응력을 부여하여 부품의 피로강도를 높이는 가공방법으로 쇼트피닝가공이 널리 쓰이고 있다.²⁾

쇼트피닝가공은 많은양의 쇼트볼을 일정한 속도로 금속표면에 투사하여 발생하는 운동에너지를 전이(transformation)시킴으로써 금속의 표면은 소성변형을 일으키게 된다. 이러한 소성변형은 표면에 가공경화층과 압축잔류응력층을 형성하게 되고, 여기서 표면의 가공경화는 피로강도에 영향을 주지 않지만 표면에 형성된 압축잔류응력은 피로강도에 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있다. 특히 압축잔류응력은 금속표면에서 최대값을 갖는 것이 아니라 표면아래에 형성하게 되지만 표면부 가까이에 형성되고 최대값이 클수록 피로강도는 향상된다.³⁾ 하지만 국내 쇼트산업이 발전되지 못하고 있어 쇼트피닝과 블라스트 산업에 관한 연구와 노력은 한층 많은 연구가 필요한 부분이다.

부식환경에서의 피로실험을 통해 부식피로균열 전진거동에 미치는 쇼트피닝의 영향에 대해서도 파

괴 역학적 관점에서 규명하여 부식 환경에서의 피로수명을 평가 하고자 한다. 이러한 연구결과를 통해 부식 환경에서의 부식으로 인한 손상을 줄이고, 각종 부품이나 구조물의 설계 시 피로수명 평가 자료에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편 및 실험장치

본 연구에 사용된 시험편은 철도차량 및 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 와이어로드 상태의 압연 스프링강(SAE 5155)으로서 Table 1은 화학적 성분, Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시험편의 기계적 성질을 나타내었다. 연속식가스로에서 970°C, 유지시간은 20분간 가열한 후 켈칭오일 40°C~80°C에서 5분간 담금질을 실시한 다음 다시 연속식 뜨임로에서 490°C로 80분간 유지하는 템퍼링을 하였다.

시험편은 부식 환경에서의 피로균열 전파거동을 관찰하기 위한 콤팩트(CT) 시험편으로, 두께는 6mm로 하였고, 각부 치수는 ASTM E647-05의 기준

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		
1350	57	44	1079	9.4

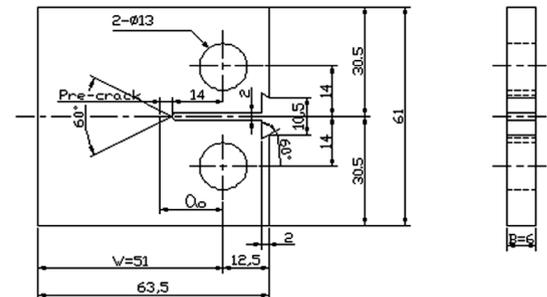


Fig. 1 Dimension of CT specimen(unit:mm)

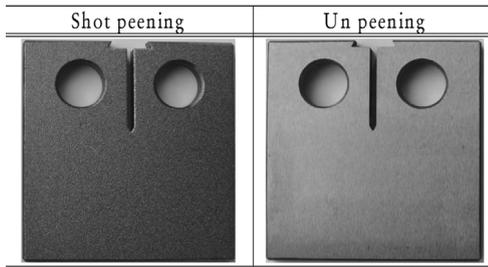


Photo. 1 Shapes of specimens

에 따라 제작하였다. Fig. 1은 시험편의 치수를 나타내었다. 또한 Photo. 1에 시험편의 형상을 Shot peening 유무에 따라 Shot peening 시험편과 Un peening 시험편 두 가지로 나누어, 두께 20mm 판재에서 산소 절단기를 이용하여 압연방향이 하중방향이 되게 L-T방향으로 채취하였고, 각부 치수는 ASTM E647-05의 기준에 따라 외형가공은 밀링(Milling)으로, 노치홈은 와이어커팅 방전가공기(Wire cutting electrical discharge machine)에서 노치 끝부분이 60°의 각도에 노즈 반지름 0.1mm가 되게 가공하였다.^{4,6)}

기계 가공된 노치는 매우 둔한 첨단을 가지고 있어 피로균열성장실험의 기본역학인 선형탄성파괴역학(Linear Elastic Fracture Mechanics)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°C 정도의 온도환경과 항복강도 이내의 응력범위에서 ASTM E647-05 규정에 의거해 3mm의 피로예비균열을 주었다.^{6,9)}

Shot peening 가공은 CT 시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전 터빈방식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 조건하에서 Shot peening 가공을 실시하였다. Shot peening 가공속도는 앞선 연구결과에서 최대의 압축잔류응력을 형성하는 2200 rpm에서 실시하였다. 표면에 형성된 압축잔류응력은 Fig. 2와 같이 최대값(730MPa)이 표면으로부터 110 μ m깊이에 형성되었음을 X-선 잔류응력기(Rigaku-MSF2M)로 측정하였다. 또한 시험편 표면 전체에 균일한 가공면을 얻기 위해 양면을 Shot peening 가공하였다.

Table 3 Conditions of shot peening process

Impeller diameter (mm)	Shot velocity (m/s)	Shot ball diameter (mm)	Arc height (mm)	Coverage (%)
490	2200	0.8	0.375	95

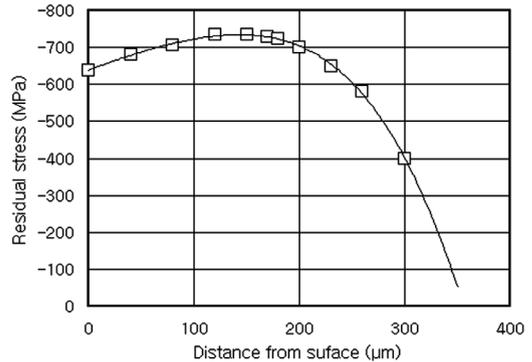


Fig. 2 Compressive residual stress distributions produced by shot peening

2.2 실험방법

부식 침지실험을 위한 장치로는 부식 환경조에 상온(25°C)에서 탈기처리하지 않은 세 가지 부식용액(3.5% NaCl, 10% HNO₃ + 3% HF, 6% FeCl₃)을 넣은 후 12개월 동안 침지시켰다.

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 적용 하중 파형은 정현파로 하였다. 응력비 R=0.05, 주파수는 10Hz로 적용하였으며, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-05의 규정에 따라 상온에서 각각의 시험편을 실험하였다. 시험편의 초기 크랙은 초기응력확대계수 범위 ΔK 를 10MPa \sqrt{m} 으로 하여 초기 ΔK 의 95% 범위 내에서 ΔK 증가법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.⁶⁾ 이때 초기 크랙진전길이는 3~5mm 지점에서 다시 95% 범위내의 ΔK 감소법으로 하여 피로균열 진전이 정지될 때까지 실험하였다.

각 부식 환경에서의 Shot peening의 효과를 알아보기 위한 부식용액은 부식형태 중 공식(6% FeCl₃)과 입계부식(10% HNO₃ + 3% HF), 그리고 일반해수 환경(3.5% NaCl)에서의 Shot peening 효과를 알아보기 위해 탈기처리 하지 않은 수용액을 선정하여, 부

식 환경조에 부은 후 Shot peening 시험편과 Un peening 시험편을 각 조건에서 각각 3개씩 시험편을 넣어 시험편들끼리 접촉하지 않도록 고정시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식환경에서의 Shot peening효과

부식 환경에서의 Shot peening의 효과는 Shot peening 가공 시 재료의 표면에 형성된 압축잔류응력층의 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.^{10,11)} 그러나 Shot peening가공의 경우 초기에 재료 표면에 형성된 균일한 압축잔류응력층이 부식진행에 따라 생성된 성장응력과의 상호작용에 의해 외부환경에 대한 모재의 보호층 역할을 한 것으로 판단된다.

Fig. 3에 나타낸 것처럼 부식 환경에서는 부식이 진행됨에 따라 보호피막이 생성 및 성장하여 보호피막이 탈락하게 된다. 이 보호피막을 탈락하게 하

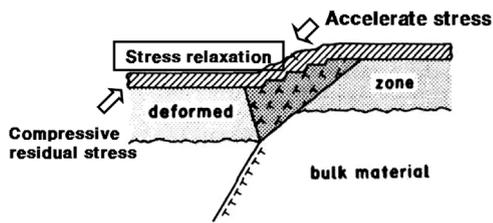


Fig. 3 Schematic diagram of stress decrease by corrosion

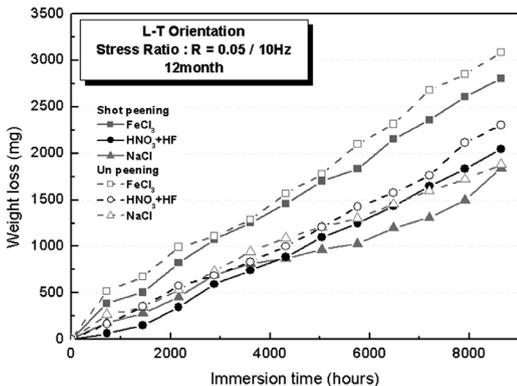


Fig. 4 Weight loss versus immersion time of specimens

는 힘이 성장응력으로서 성장응력이 (+)축 응력이면 압축잔류응력은 (-)축 응력으로서 응력이완에 의해 보호피막의 형성시간이 길어져 외부 부식 환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로 판단된다. 이와 같이 부식환경에서는 Fig. 4와 같이 전반적으로 Shot peening 시험편이 Un peening 시험편보다 낮은 무게감소량을 나타내고 있다.

3.2 부식환경에 따른 피로균열전파특성

Fig. 5는 세 가지 부식용액에서 최대 투사속도(70%)에서 Shot peening 가공한 시험편과 Un peening 시험편의 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수 범위(ΔK)와의 관계를 양대수 좌표로 나타낸 것이다.

상온에서보다 부식환경에서 da/dN 가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 침지기간 초기에 재료 표면에 이상적인 위치 즉 부분적인 전기화학적 작용에 의해 응력집중이 걸리는 부분 균열선단에 부식피트가 생성된다. 이 부식피트가 시간이 경과할수록 성장 및 합쳐짐으로써 염소이온의 농축화가 쉽게 이루어짐으로써 해서 상온과는 달리 부식환경에서 추가적인 화학적 손상에 의해 빠른 균열속도가 나타난 것으로 판단된다.

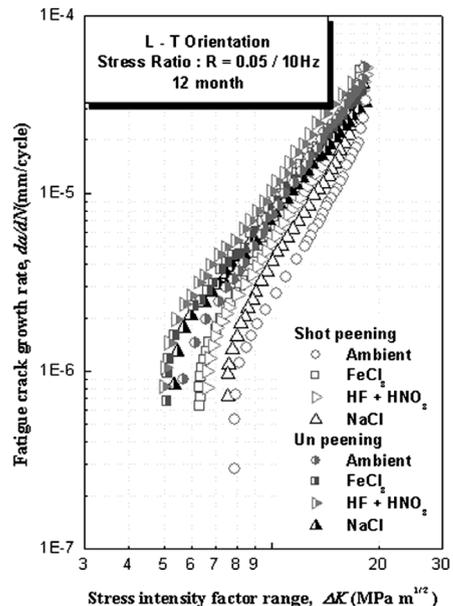


Fig. 5 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of materials

Shot peening 가공한 시험편과 Un peening 시험편의 3.5% NaCl 수용액과 상온에서의 da/dN와 ΔK와의 관계에서는 Shot peening 시험편이 Un peening 시험편에 비해 균열속도가 낮은 것을 알 수가 있다.

6% FeCl₃ 수용액과 상온에서의 da/dN와 ΔK와의 관계에서도 da/dN가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 초기에 재료표면에 이상적인 위치 즉 부분적인 전기화학적 작용에 의해 응력집중이 걸리는 부분 균열선단에 부식피트가 생성된다. 이 부식피트가 시간이 경과할수록 성장 및 합쳐짐으로써 염소이온의 농축화가 쉽게 이루어짐으로 해서 상온에서와는 달리 부식 환경에서 추가적인 화학적 손상에 의해 빠른 균열속도가 나타난 것으로 판단된다.

10% HNO₃ + 3% HF 수용액과 상온에서의 da/dN와 ΔK와의 관계에서는 부식 환경에서의 균열전파 과정에 있어서 Shot peening 시험편의 경우 상온보다 낮은 속도를 나타내고 있다. 이는 이 재료에 포함된 Cr의 고용량이 커서 Fe-Cr의 탄화물이 피로균열 전파과정에 균열면 사이에서 쉼 역할을 함으로써 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다.

부식환경에서의 da/dN를 비교해보면 6% FeCl₃ 수용액이 가장 높은 da/dN를 나타내고 있고 3.5% NaCl 수용액이 가장 낮은 da/dN를 나타내고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 부식형태 중에서 입계부식에서는 Shot peening 시험편이 Un peening 시험편보다 피로균열진전동안 다소 나은 부식피로균열저항성을 나타내고 있다. 또한 Shot peening가공은 공식 보다는 입계부식에서 그 효과가 크게 나타나고 있는 것을 알 수 있다.

3.3 하한계 응력확대계수와 부식환경과의 관계

Fig. 6은 상온과 세 가지 부식 환경에서의 12개월 침지기간에 따른 하한계 응력확대계수(ΔK_{th})와의 관계를 나타낸 것이다. 상온에서보다 부식 환경에서 그 값이 감소되고 있는 것을 알 수가 있다. 이는 낮은 주파수와 응력확대계수 범위에서 균열선단에서의 전기화학적 작용의 영향으로 인해 부분적인 부식피트가 발생 및 성장으로 인해 낮은 하한계 응력확대계수 값을 나타낸 것으로 판단된다.

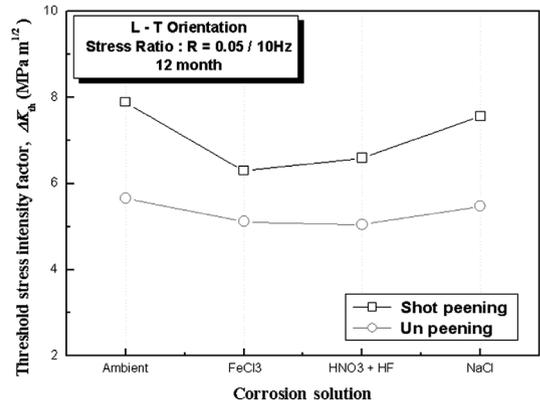


Fig. 6 Relation between threshold stress intensity factor and corrosion solutions

3.4 재료상수와 부식환경과의 관계

Fig. 7은 피로균열진전거동 중 Stage II의 Paris식 da/dN=C(ΔK)^m에 따른 피로균열진전지수(m)와 재료상수(C)를 부식 환경에 따른 정량적인 값을 비교하여 나타낸 것이다. 전반적으로 Un peening 시험편이 Shot peening 시험편보다 낮은 피로균열진전지수 값을 나타내고 있다. 피로실험 결과를 보면 상온보다 부식환경에서 재료상수의 값이 증가하는 경향이 있고, 피로균열진전지수는 그와의 반대의 경향을 나타내고 있다.

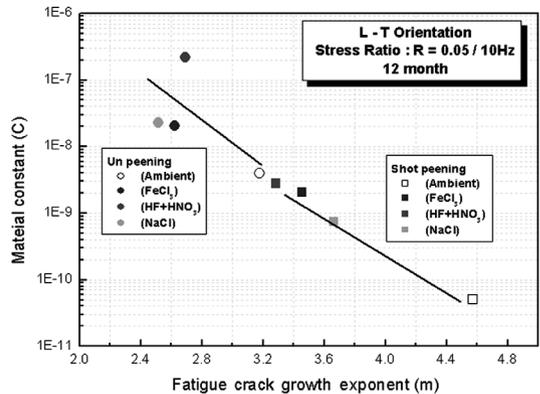
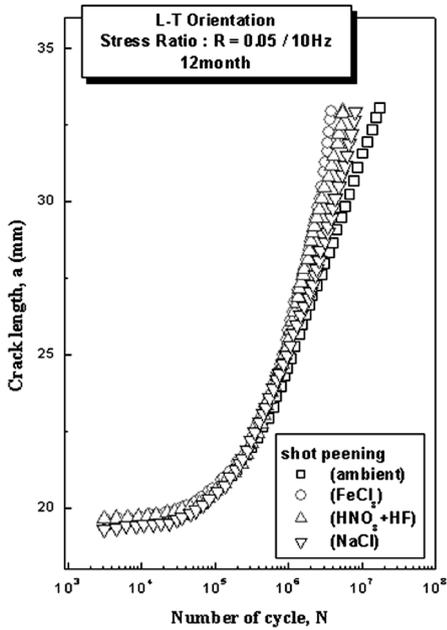


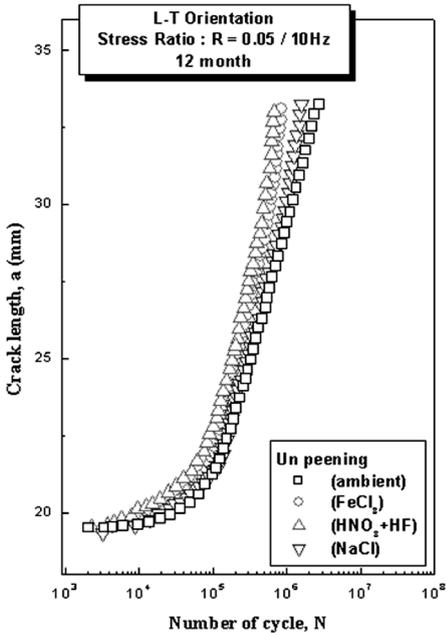
Fig. 7 Correlation between C and m in paris equation

3.5 피로균열진전길이와 사이클 수

Fig. 8은 상온과 부식 환경에서 응력비 R=0.05, 주파수 10Hz에서 피로균열진전길이와 사이클 수와의 관계를 나타낸 것이다. Table 4는 균열길이 30mm지



(a) Shot peening



(b) Un peening

Fig. 8 Relation between crack length and number of cycle

점을 기준으로 하여 수치로 비교한 것이다. 각 조건에서 사이클 수는 shot peening 시험편이 un peening 시험편보다 상온에서 453% 증가하였고, 부식 환경

Table 4 Number cycle at the crack length of 30mm

Corrosion solution	Shot peening	Un peening
Ambient	6.53×10^6	1.18×10^6
6% $FeCl_3$	2.48×10^6	6.29×10^5
10% HNO_3 + 3% HF	2.85×10^6	4.84×10^5
3.5% NaCl	4.17×10^6	8.93×10^5

에서는 6% $FeCl_3$ 수용액의 경우 294%, 10% HNO_3 + 3% HF 수용액의 경우는 488%, 3.5% NaCl 수용액에서는 366%가 증가 되었다. 즉 입계부식에서 Shot peening 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

전반적으로 세 가지 부식액 중 shot peening에서 공식(6% $FeCl_3$)의 피로수명이 낮은 것으로 나타났다. 이는 전면부식보다는 국부적인 공식이 진행됨에 따라 염소이온에 의해 부식피트가 발생하여 결과적으로 응력집중현상이 발생할 수 있다. 이러한 응력집중은 초기에 shot peening 가공에 의해 생성된 균일한 압축잔류응력층의 불균일한 형성을 유도함으로써 부식의 진행을 활성화 시킨 것으로 판단된다.

4. 결론

자동차 현가장치재의 부식피로에 미치는 압축잔류응력을 부여한 스프링강의 세 가지 부식액에 12개월(365일)동안 침적시킨 후 피로균열진전시험을 통하여 피로균열진전거동에 미치는 부식형태에 따른 피로특성에 대한 연구를 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 부식 환경에서는 쇼트피닝 가공 시 재료에 형성된 압축잔류응력이 부식의 진행에 따라 생성된 성장응력과의 상호작용에 의해 보호피막의 생성시간이 길어져 언피닝재에 비해 부식에 대해 저항성이 높은 것으로 나타났다.
- 2) 각 부식수용액에서의 피로균열진전속도는 전반적으로 쇼트피닝재가 언피닝재에 비해 낮은 피로균열속도를 나타내었다. 이는 압축잔류응력이 균열진전과정에서 균열선단의 구속력으로 작용하여 피로균열진전속도 지연효과가 나타난 것으로 판단된다.
- 3) 부식환경에서의 피로균열진전거동은 상온과 달리 균열선단에서의 화학적 손상과 기계적 손상

의 복합작용으로 빠른 균열속도를 나타내었다.

- 4) 하한계 응력확대계수에는 상온보다 부식 환경에서 낮은 값을 보였다. 이는 낮은 주파수와 응력확대계수범위에서는 균열선단에서의 전기화학적 작용으로 부분적인 부식피트 발생 및 성장으로 낮은 값을 나타낸 것으로 판단된다.
- 5) 피로수명에 있어서는 상온에서는 shot peening 시험편이 Un peening 시험편보다 453% 증가하였고, 세 가지 부식액에 침지시킨 후 6% FeCl₃ 수용액의 경우 294%, 10% HNO₃ + 3% HF 수용액의 경우는 488%, 3.5% NaCl 수용액에서는 366%로 입계부식에서 Shot peening 효과가 크게 나타나고 있음을 알 수 있다.

References

- 1) D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd Edn., Prentice Hall, New Jersey, 1995.
- 2) 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.
- 3) K. D. Park and C. G. Jung, "The Effect of Compress Residual Stresses for Fatigue Strength of DIN50CrV4-SAE9254 Steel," KSOE, Vol.15, No.3, pp.94-99, 2001.
- 4) K. D. Park, "A Study of High Temperature Fatigue Crack Growth and Crack Propagation of Low-alloy Steel for Atomic Reactor," Ph. D. Dissertation, Dong-A University, 1983.
- 5) K. Hideo, Fracture Mechanics, Tokyo, Public Publication, pp.57-63, 131-135, 1993.
- 6) ASTM : E647-05, Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, pp.1-45, 2005.
- 7) Y. B. Lee, H. K. Kim and J. S. Jung, Basic of Fatigue Analysis, pp.99-125, 1999.
- 8) The Japan Society of Mechanical Engineers, Standard Method of Test for Elastic-Plastic Fracture Toughness JIC, JSME S 001-1981.
- 9) Advanced Fatigue Crack Propagation, Instron 2490 Series Application Programs, pp.1-4, 1991.
- 10) 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.
- 11) M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.