

SAE 5155강에서 쇼트피닝이 부식과 피로균열특성에 미치는 영향

박경동† · 신영진* · 김동욱**

(원고접수일 : 2006년 8월 2일, 심사완료일 : 2006년 9월 28일)

The Effect of Shot Peening on the Corrosion and Fatigue Crack to SAE5155 Steel

Kyeong-Dong Park† · Yung-Jin Sin* · Dong-Ug Kim**

Abstract : Corrosion and lassitude are very important in the metal construction. Currently, the shot peening is used much for removing the defect on the surface, improving the fatigue strength on surface. In this study, the influence of shot peening to the corrosion property were investigated in 3.5% NaCl, 10% HNO₃ + 3% HF, 6% FeCl₃. The immersion test was performed on two kind of specimen(Removed corrosion product: RCP and Continuous immersed specimen: CIS). The immersion periods was 3600hours. Corrosion potential, weight loss, and fatigue crack growth characteristics were investigated. The result, shot peening in corrosion potential showed stable potential. Also, shot peening displayed small Weight loss than un peening. And Fatigue crack resistivity of shot peening in corrosion solution's fatigue crack appeared greatly than un peening.

Key words : Shot peening(쇼트피닝), Corrosion potential(부식전위), Weight loss(무게감소량), Fatigue crack(피로균열)

1. 서 론

재료의 고강도화는 설계형상이나 반복되어 가해지는 외부하중 또는 진동조건에 따라 차이는 있지만 금속표면 또는 금속내부의 결함에 의해 항복응력 이하의 응력에서도 균열이 개시되고 서서히 성장하여 최종적으로 파괴되는 현상이 발생 할 수 있다⁽¹⁾. 더욱이 부식 환경에서는 재료의 표면에 가해

지는 응력조건이 현저히 다른 응력이 발생할 경우 응력이 많이 걸린 부분이 부식진행에 있어서 양극으로 작용하여 국부적으로 부식의 진행이 활성화될 수 있는 요인으로 작용하고 있다^(2~4). 따라서 부식 환경에서의 기계부품이나 구조물은 화학적 변수가 기계적 변수와의 복합적인 작용으로 인해 단수명이나 저 하중 조건에서도 균열이 발생하여 안정성과 신뢰도에 많은 위협이 되고 있다.

† 책임저자(부경대학교 기계공학부), E-mail: parkkd@pknu.ac.kr, Tel: 051)620-1592

* 부경대학교 대학원

** 부경대학교 대학원

현재 선박이나 자동차분야에서 밸브 스프링, 판스프링, 클러치, 커넥팅 로드, 크랭크 축, 코일 스프링과 같은 부품은 상온에서 피로수명 연장방법으로 쇼트피닝 가공을 통해 재료의 표면부에 압축잔류응력을 부여하는 방법이 많이 사용되고 있다⁽⁵⁻⁷⁾. 이는 쇼트피닝 가공에 의해 금속표면부에 형성된 압축잔류응력은 반복하중을 받는 금속표면부에서의 인장력과 상쇄되어 표면부에 걸리는 응력을 감소시켜 표면부위의 피로균열 개시를 지연시켜 주고 균열의 안정 성장을 지연시켜 피로수명을 향상시키기 때문이다. 하지만 쇼트피닝의 고온과 저온에서의 효과에 대한 연구는 많이 이루어졌으나, 부식 환경에서의 그 효과에 대해서는 아직 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 선박, 자동차나 철도의 현가장치 재료로 사용되고 있는 스프링강에 쇼트피닝 가공을 실시하여 세 가지 부식 용액(3.5% NaCl 수용액, 6% FeCl₃수용액, 3%HF + 10%HNO₃ 수용액)에서 실험하였으며, 압축잔류응력에서의 쇼트피닝의 효과에 대해서 알아보려고 한다. 또한 이러한 연구결과를 통해 부식 환경에서의 부식으로 인한 손상을 줄이고, 각종 부품이나 구조물의 설계시 피로수명 평가 자료로 활용을 함으로써 안전설계에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 선박 및 자동차 현가장치에 주로 사용되고 있는 와이어로드 상태의 압연 스프링강(SAE 5155)이며, Table 1에 이 재료의 화학적 성분을 나타내었고, 연속식가스로에서 970℃, 유지시간은 20분간 가열한 후 퀘칭오일 40℃~80℃에서 5분간 담금질을 실시한 다음 다시 연속식 뜨임로에서 490℃로 80분간 유지하는 템퍼링을 실시한 시험편의 기계적 성질을 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of spring 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 spring steels after heat treatment

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

Table 3 Conditions of shot peening

Impeller Diameter (mm)	Shot Velocity (rpm)	Shot Ball Diameter (mm)	Arc Height (mm)	Coverage (%)
490	2200	0.8	0.375	95

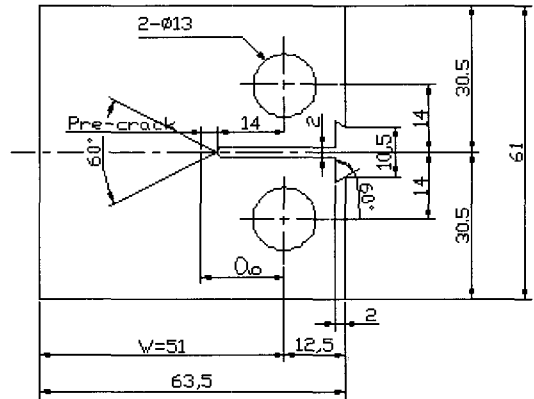


Fig. 1 Shape and dimensions of CT specimen

침지시험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 하였고, 그 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 시험편의 쇼트피닝 유무에 따라 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편 두 가지로 하였다. 쇼트피닝 가공은 판스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 Table 3과 같은 조건하에서 실시하였으며 시험편 표면에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위해 양면을 쇼트피닝 가공하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

침지시험에 사용된 부식액으로는 용존산소를 제거하지 않은 3.5% NaCl, 6% FeCl₃, 3%HF + 10% HNO₃수용액 세 가지를 사용하여 3600시

간 동안 침지시켰다. 기준전극은 은/염화 전극 (Ag/AgCl electrode)으로 하고 시험편을 작동전극(working electrode)으로 하여 부식전위를 측정하였다. 그리고 무게감소량은 침지 전에 미소전자저울(HR-200)로 중량을 측정하고 침지 후 360시간 간격으로 3600시간 동안 부식 환경조에서 시험편을 꺼내어 부식생성물을 완전히 제거한 후 그 중량변화로서 측정하였다.

침지시험 후에는 시험편의 부식생성물을 제거하고 다시 침지한 시험편(Removed corrosion product: RCP)과 계속 침지한 시험편(Continuous immersed specimen: CIS) 두 가지로 나누어서 부식환경에서 그 차이를 알아보려고 하였다.

피로균열진전실험은 전기유압서보 피로시험기(Instron 8821S, 100KN)에 의한 하중제어 방식으로 실험하였다. 적용 하중 파형은 정현파로 하고 적용 응력비 $R=0.05$, 주파수는 10Hz로 하였으며, 피로균열 길이측정은 COD 클립게이지를 이용한 컴플라이언스법으로 ASTM E647-93의 규정에 따라 상온에서 실험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 시험편의 잔류응력

Fig. 1의 완성된 CT시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 고속회전터번식 쇼트피닝기로 Table 3과 같은 쇼트피닝 조건하에서 쇼트피닝을 시행하였으며 표면에 형성된 압축잔류응력은 최대 값이 -730MPa 이 표면으로부터 $110\mu\text{m}$ 깊이에 형성되었다.

3.2 부식전위의 변화

Fig. 2~4는 탈기처리하지 않은 3.5% NaCl수용액, 6% FeCl_3 수용액, 3% HF + 10% HNO_3 수용액에 150일 동안 침지시켜 매 24시간마다 측정하였다.

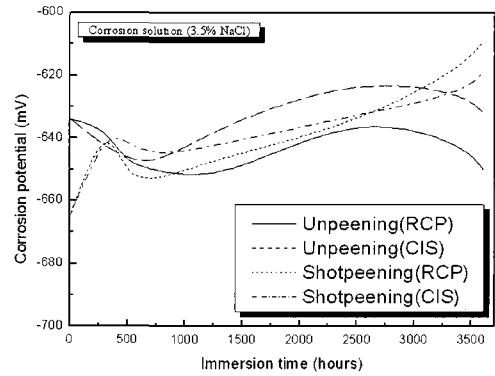


Fig. 2 Corrosion potential with immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

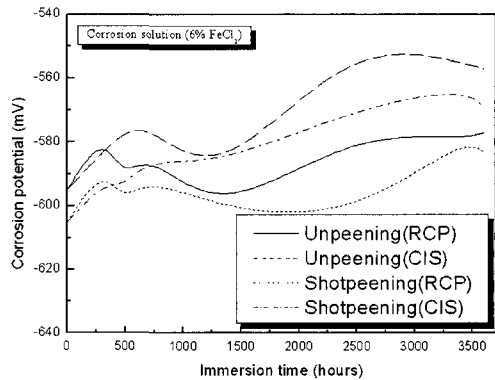


Fig. 3 Corrosion potential with immersion time of specimens in 6% FeCl_3 solution

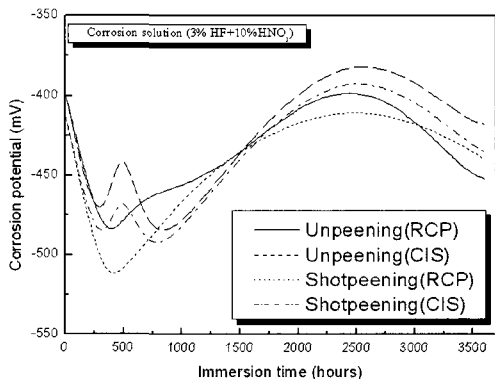


Fig 4 Corrosion potential specimens in 10% HNO_3 + 3% HF solution

Fig. 2의 3.5% NaCl수용액에서 전위는 초기 쇼트피닝제가 비방향(-축 방향)으로 형성되고 연피

닝재는 귀방향(+축 방향)으로 부식전위가 나타났다. 그리고 부식이 진행 된지 3360시간 부터 차츰 쇼트피닝재가 귀방향으로 형성되고 언피닝재가 비방향의 전위를 보였다.

Fig 3은 6% FeCl₃수용액에서의 전위를 나타낸 것이다. 초기 전위는 3.5% NaCl수용액과 같이 쇼트피닝재가 비방향(-축 방향)으로 형성되고 언피닝재는 귀방향(+축 방향)으로 전위의 형성을 보였다. 그리고 3600시간동안 부식한 시편의 전위를 측정할 결과 귀방향 순으로 언피닝 CIS - 쇼트피닝 CIS - 언피닝 RCP - 쇼트피닝 RCP 로 나타났다.

Fig 4은 3% HF + 10% HNO₃수용액에 3600 시간 동안 침지 실험한 전위를 나타낸 것이다. 부식 후 전위를 측정할 결과 귀방향 순으로 언피닝 CIS - 쇼트피닝 CIS - 쇼트피닝 RCP - 언피닝 RCP 로 나타났다.

초기에는 전반적으로 쇼트피닝재가 언피닝재보다 비방향(-축 방향)으로의 전위가 형성되어 있는 것을 알 수가 있다. 이는 쇼트피닝재가 쇼트볼 충돌에 의해 표면이 거칠어져 있어 부식가속화의 요인으로 작용한 것으로 판단된다^[8]. 그러나 전체 측정결과를 보게 되면 3가지용액 모두에서 언피닝재보다 쇼트피닝재가 안정된 전위를 형성하고 있다. 다시 말해 부식에 대한 재료의 저항이 언피닝재보다 쇼트피닝재가 크다고 볼 수 있다.

이는 쇼트피닝 가공을 하게 되면 표면에 압축잔류응력이 생기며 표면 전체가 균일한 응력 상태가 된다고 볼 수 있다. 그리고 균일한 응력 상태에서는 국부적인 부식반응을 촉진시키는 국부 전지(Cell)에 의한 영향이 감소된다고 볼 수 있다. 또한 부식생성물을 제거하고 다시 침지한 시험편(RCP)의 경우는 부식된 피막이 제거되어 계속 침지한 시험편(CIS)에 비해 비방향의 전위가 형성되어 있음을 알 수가 있다. 하지만 3600시간의 결과만을 놓고 세 가지 부식액에 따른 부식전위의 형태를 보면 3% HF + 10% HNO₃수용액을 제외한 수용액에서는 모두 비방향의 전위값을 형성한 것을 알 수가 있다. 이는 염소이온의 빠른 침투로 피막

의 국부적인 파괴에 따른 활성화로 인해 양극분극의 억제로 낮은 부식전위값을 나타낸 것으로 판단된다.

3.3 부식액에 따른 무게감소량의 변화

무게감소량 측정에 사용된 시험편인 RCP (Removal corrosion chemical)의 경우 3600시간 동안 360시간 간격으로 측정할 무게감소량을 나타내었고 CIS (Continuous immersed specimen)의 경우 2160시간 동안 계속 침지 후 측정할 CIS#1시편과 3600시간 동안 계속 침지 후 측정할 CIS#2시편으로 구분하여 실험하였다.

Fig. 5~6은 3.5% NaCl에서 쇼트피닝재와 언피닝재를 침적실험에 따른 무게감소량이다.

Fig. 5에 쇼트피닝한 RCP의 경우 시간당 평균 감소량이 0.226(mg/hours), CIS#1은 0.205(mg/hours), CIS#2는 0.210(mg/hours)로 나타났다. 또한 Fig. 6에 언피닝한 시험편의 경우 RCP는 0.261(mg/hours), CIS#1은 0.231(mg/hours), CIS#2는 0.239(mg/hours)로 나타났다. 그리고 시간이 경과할수록 쇼트피닝재와 언피닝재의 차이가 줄어드는 이유는 쇼트피닝재의 표면에 생성된 기공과 미소균열에 염소이온의 농축으로 인해 쇼트피닝 층의 용해가 서서히 시작되었기 때문으로 판단된다^[9].

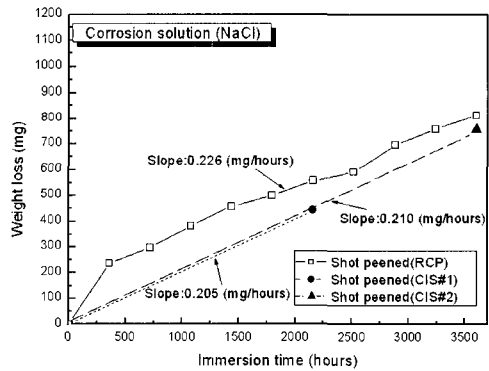


Fig. 5 Weigh loss with immersion time of shot peened specimens in 3.5% NaCl

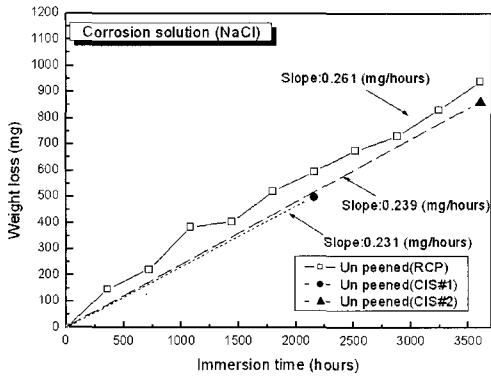


Fig. 6 Weigh loss with immersion time of unpeened specimens in 3.5% NaCl

Fig. 7~8은 6% $FeCl_3$ 수용액에서 쇼트피닝재와 언피닝재를 침적실험에 따른 무게감소량이다.

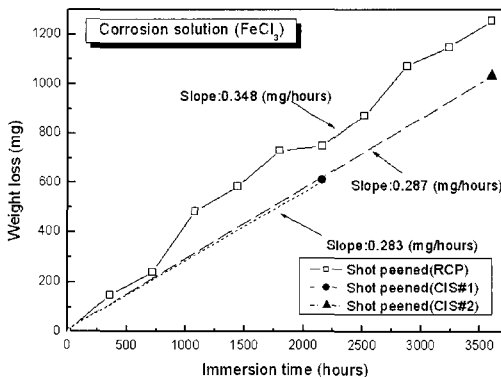


Fig. 7 Weigh loss with immersion time of shot peened specimens in 6% $FeCl_3$

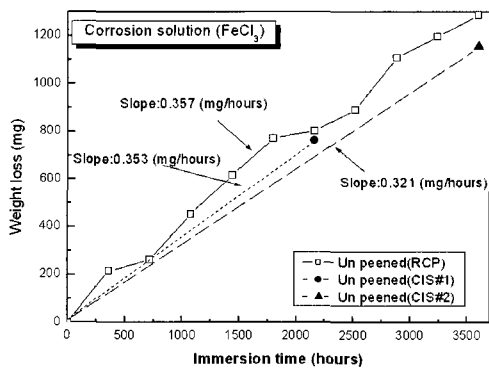


Fig. 8 Weigh loss with immersion time of unpeened specimens in 6% $FeCl_3$

Fig. 7에 쇼트피닝한 RCP의 경우 시간당 평균 감소량이 0.348(mg/hours), CIS#1은 0.283(mg/hours), CIS#2는 0.287(mg/hours)로 나타났다. 또한 Fig. 8에 언피닝한 시험편의 경우 RCP는 0.357(mg/hours), CIS#1은 0.353(mg/hours), CIS#2는 0.321(mg/hours)로 나타났다.

그림에서 볼 수 있듯이 6% $FeCl_3$ 수용액에서 가장 많은 무게감소량을 나타내었다. 이는 $FeCl_3$ 가산을 생성할 뿐만 아니라 $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ 의 환원 반응으로 산화력을 추가적으로 제공함으로써 부식을 가속화시키고 있기 때문이다.

Fig. 9~10은 3% HF + 10% HNO_3 수용액에서 쇼트피닝재와 언피닝재를 침적실험에 따른 무게감소량이다.

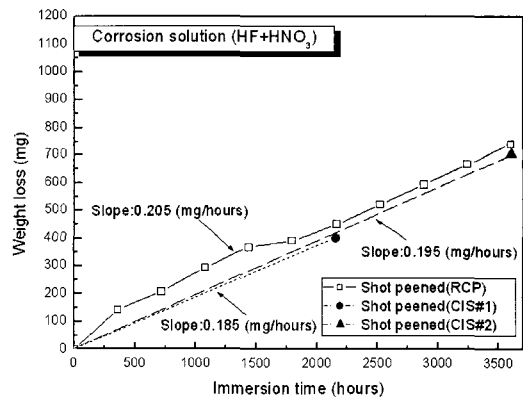


Fig. 9 Weigh loss with immersion time of shot peened specimens in 3% HF + 10% HNO_3

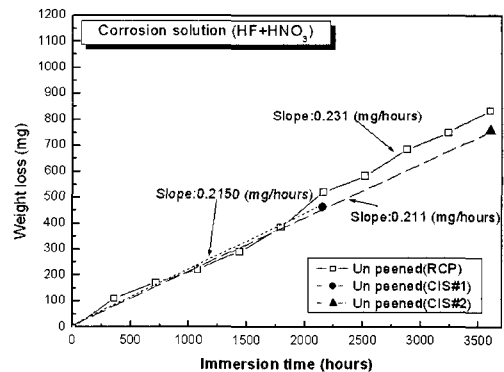


Fig. 10 Weigh loss with immersion time of unpeened specimens in 3% HF + 10% HNO_3

Fig. 9에 쇼트피닝한 RCP의 경우 시간당 평균 감소량이 0.205(mg/hours), CIS#1은 0.185 (mg/hours), CIS#2는 0.195(mg/hours)로 나타났다. 또한 Fig. 10에 연피닝한 시험편의 경우 RCP는 0.231(mg/hours), CIS#1은 0.215 (mg/hours), CIS#2는 0.211(mg/hours)로 나타났다.

3% HF + 10% HNO₃용액은 3.5% NaCl보다 산화성 산(oxidizing acid)으로 큰 부식성을 가지고 있음에도 불구하고 시험편의 무게감소량은 적었으며 2160시간이 지나고부터는 일정하게 증가하는 무게감소량을 보였다.

전체적으로 쇼트피닝제와 연피닝제의 무게감소량을 비교해 보면 Table 4에서 보는 것과 같이 3.5% NaCl의 경우 3600시간 침지 후 100mg, 6% FeCl₃의 경우 50mg, 3% HF + 10% HNO₃의 경우 70mg정도 연피닝제가 쇼트피닝제보다 많은 무게 감소량이 나타났다.

Table 4 Weight loss ratio of specimens by corrosion

Weight loss ratio	RCP		CIS	
	Shot peening [mg]	Un peening [mg]	Shot peening [mg]	Un peening [mg]
3.5% NaCl	814	940	759	862
6% FeCl ₃	1254	1286	1035	1156
3% HF + 10% HNO ₃	741	835	705	760

3.4 각종 부식 환경에서의 피로균열전파 특성

Fig. 11는 쇼트피닝 가공한 시험편과 연피닝 시험편을 3.5%NaCl수용액의 720시간과 2160시간 동안 침지 부식한 시험편과 부식하지 않은 재료를 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계로 도시화한 그래프이다.

쇼트피닝 시험편이 연피닝 시험편에 비해 균열속도가 낮은 것을 알 수가 있다. 그러나 10%HNO₃ +3%HF수용액과 비교해서는 그 효과가 떨어지고 있음을 알 수가 있다. 이는 균열선단에서의 화학적 손상 즉 Cl⁻이온에 의한 국부적인 파괴와 더불어 기계적인 손상이 중첩이 됨으로써 균열진전의 가속화가 일어난 것으로 판단된다.

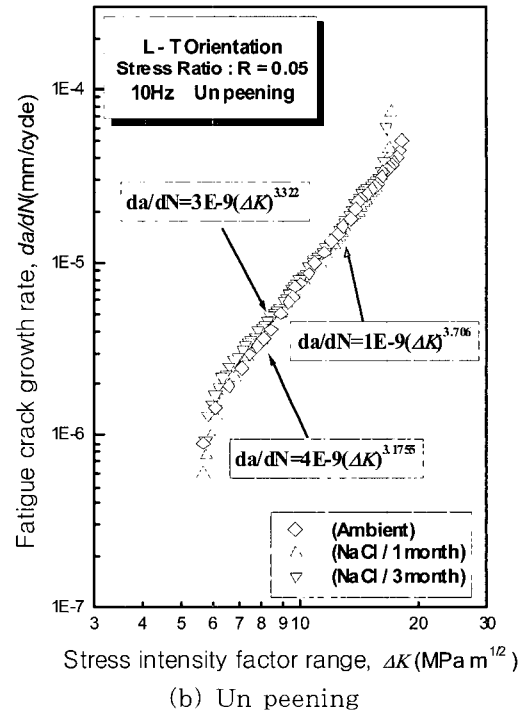
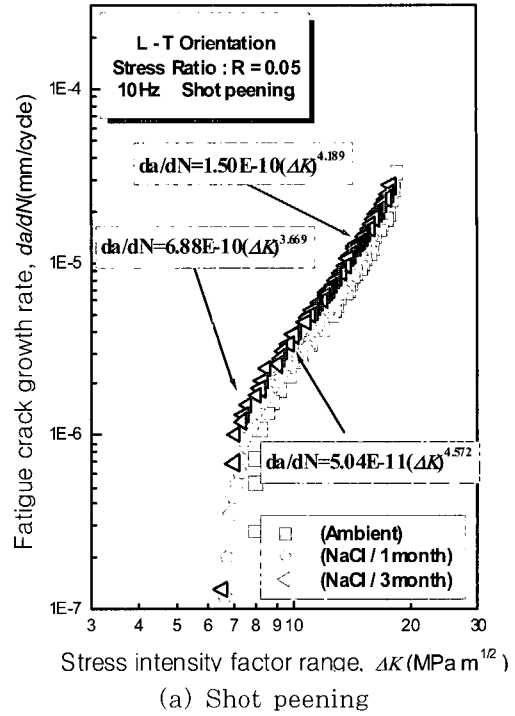
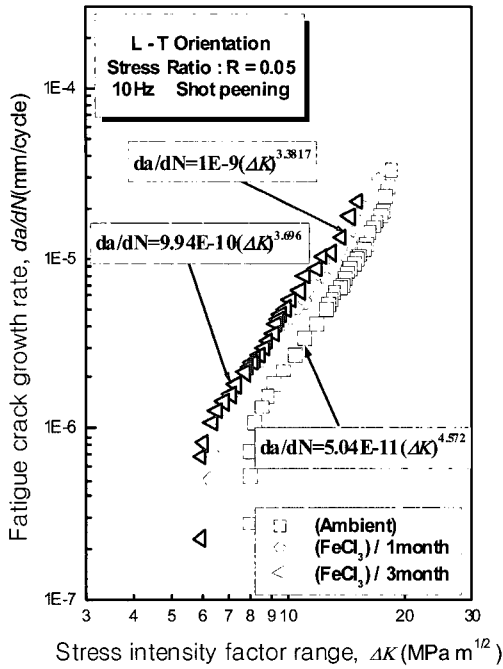
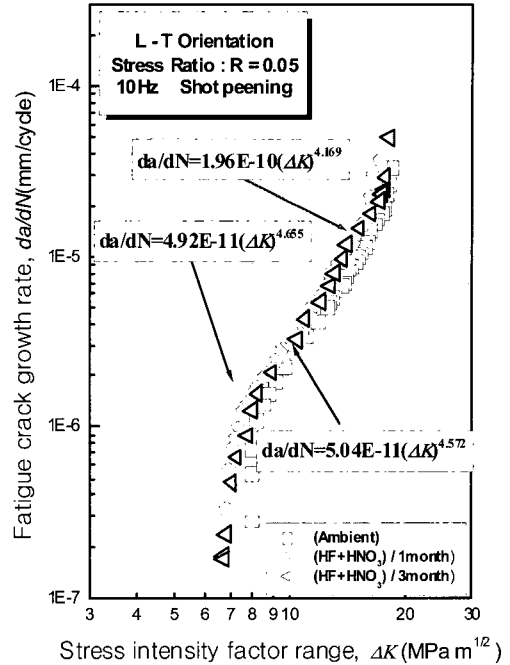


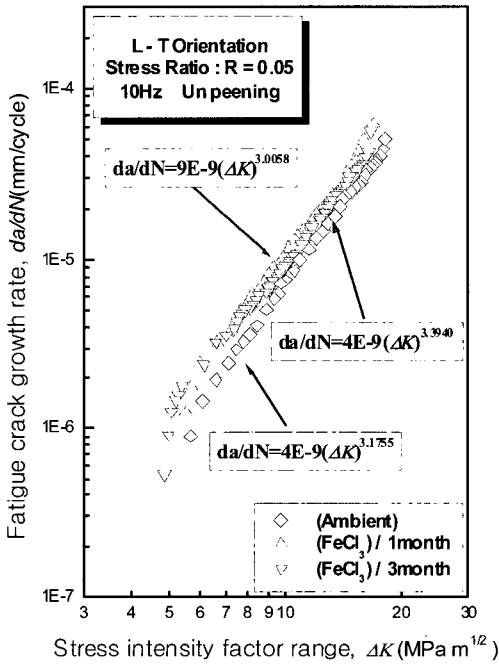
Fig. 11 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of materials



(a) Shot peening

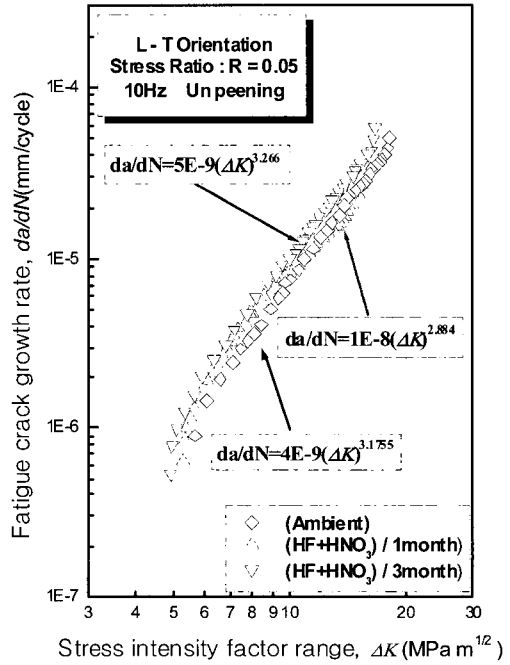


(a) Shot peening



(b) Un peening

Fig. 12 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of materials



(b) Un peening

Fig. 13 Relation between fatigue crack growth rate and stress intensity factor range of materials

Fig. 12는 쇼트피닝 가공한 시험편과 언피닝 시험편의 6% FeCl₃수용액의 720시간과 2160시간 동안 침지 부식한 시험편과 부식하지 않은 재료를 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계로 도시화한 그래프이다.

부식 환경에 있어서도 두 가지 종류의 시험편 모두 침지시간이 길어짐에 따라 피로균열전파속도가 증가하는 양상을 나타내고 있다. 이는 두 시험편 모두 침지시간 초기에 재료표면에 이상적인 위치 즉 부분적인 전기화학적 작용에 의해 응력집중이 걸리는 부분 균열선단에 부식피트가 생성된다. 이는 부식에 의한 피팅으로 시간이 경과할수록 성장 및 합쳐짐으로써 염소이온의 농축화가 쉽게 이루어짐으로 해서 부식하지 않은 재료에서와는 달리 부식 환경에서 추가적인 결함으로 의해 빠른 균열속도가 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 13은 쇼트피닝 가공한 시험편과 언피닝 시험편의 10%HNO₃+3%HF수용액의 720시간과 2160시간 동안 침지 부식한 시험편과 부식하지 않은 재료를 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계로 도시화한 그래프이다.

부식 환경에서의 균열전파과정에 있어서 쇼트피닝 시험편의 경우 부식하지 않은 재료보다 오히려 낮은 속도를 나타내고 있다. 이는 이 재료에 포함된 Cr의 고용량이 커서 Fe-Cr의 탄화물이 피로균열전파과정에 균열면 사이에서 쉼 역할을 함으로써 이와 같은 결과가 나온 것으로 판단된다. 이에 대한 자세한 연구는 추후에 연구할 소지가 있을 것으로 생각된다.

따라서 결론적으로 부식형태 중에서 입계부식에서는 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편보다 피로균열전동동안 다소 나은 부식피로균열저항성을 나타내고 있다.

5. 결 론

쇼트피닝재의 부식특성을 연구하기위해 쇼트피닝재와 언피닝재를 3가지 부식용액에서 3600시간 동안 무게감량과 전위변화를 측정할 결과 및 720

시간과 2160시간 동안 부식한 시편의 피로크랙전파특성 실험을 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 부식전위의 변화에 있어서 세 가지 부식액 모두 쇼트피닝재가 언피닝재보다 안정화된 전위를 보여주며 부식에 대한 저항이 언피닝재보다 쇼트피닝재가 크다고 볼 수 있다. 또한 RCP시험편과 CIS시험편의 비교에 있어서 RCP시험편이 비방향(-축 방향)의 전위를 형성하였다. 이는 부식생성물 제거로 인해 부동태 피막이 파괴되어 부식환경에 대해 효과적으로 차단하지 못하였기 때문으로 판단된다.
2. 무게감소량에 있어서 쇼트피닝재가 언피닝재에 비해 용액에 따라 적개는 50mg에서 많게는 100mg정도의 적은 무게감소를 보였으며 6% FeCl₃가 가장 높은 수치를 나타내었다. 이는 쇼트피닝의 잔류응력으로 인한 내식성이 증가한 것으로 해석된다. 또한 6% FeCl₃에서는 $Fe^{3+} + e^{-} \rightarrow Fe^{2+}$ 의 환원 반응으로 극의 산화속도를 가속화시킴으로써 부식속도가 증가된 것으로 판단된다. 그리고 세 가지 부식액 모두 시간이 갈수록 쇼트피닝재와 언피닝재의 무게감소비율이 작아지는 것으로 봐서 부식이 진전됨에 따라 쇼트피닝의 잔류응력효과의 감소로 인한 것으로 판단된다.
3. 3.5%NaCl수용액에서 2160시간 동안 부식 침지한 시험편과 부식하지 않은 시편의 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계에서 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편에 비해 균열속도가 낮은 것을 알 수가 있다.
4. 6%FeCl₃수용액에서 2160시간 동안 부식 침지한 시편과 부식하지 않은 시편의 피로균열전파속도(da/dN)와 응력확대계수범위(ΔK)와의 관계에서 부식 환경에 있어서도 두 가지 종류의 시험편 모두 침지시간이 길어짐에 따라 피로균열전파속도가 증가하는 양상을 나타내고 있다.
5. 10%HNO₃+3%HF수용액의 부식 환경에서의 균열전파특성에 있어서 쇼트피닝 시험편의 경우 부식하지 않은 시험편보다 오히려 낮은 속도를 나타내고 있다.

참고문헌

1. 村上, 大南, オーム社, 破壊力學入門, pp.121~127, 1979.
2. W. Luo, "The Corrosion Resistance of Cr19Ni9 Stainless Steel Arc Welding Joints with and without Arc Surface Melting", Materials Science and Engineering, Volume 345, pp. 1~7, 2003.
3. J. X. Guo, J. X. Li, L. J. Qiao, K. W. Gao and W. Y. Chu, "Stress Corrosion Cracking and Hydrogen-Induced Cracking of Amorphous Fe74.5Ni10Si3.5B9C2", Corrosion Science, Volume 45, pp. 735~745, 2003.
4. D. A. Lopez, A. W. H. Schreinerb, S. R. de Sancheza and S. N. Simisona, "The Influence of Carbon Steel Microstructure on Corrosion Layers An XPS and SEM Characterization", Applied Surface Science Volume 207, pp. 69~85, 2003.
5. 정성균, 이승호, 쇼트피닝 가공개론, 세화출판사, pp. 6~12, 13~29, 78, 2001.
6. S. Tekeli, "Enhancement of Fatigue Strength of SAE 9245 Steel by Shot peening", Materials letters, Volume 57, pp. 604~608, 2002.
7. M. P. Muller, C. Verpoort and G. H. Gessinger, "The Influence of Shot Peening on the Fatigue and Corrosion Fatigue Behavior of an Austentic-Ferritic Stainless Steel", Proc. of the 1st International Conference on Shot Peening, Vol. 1, Paris, pp. 479~484, 1981.
8. Park, K. D and Ha, K. J., "Influence of Shot Peening on the Corrosion of Spring Steel", KSOE, Vol. 17, No. 3, pp 39-45, 2003
9. Gibson, F. W., "Corrosion, Concrete, and Chloride", ACISP 102, pp 13, 107, 155, 161, 1987

저자 소개



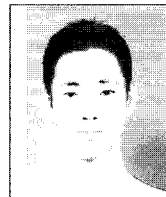
박경동 (朴卿東)

1943년 2월생. 1983년 동아대학 대학원 공학박사, 1992년 일본동경공업대학 공학박사 학위취득, 2004년도 대한기계학회 부회장, 2004년~2006년 산업자원부 전문위원, 1973년 3월~현재 부경대학교 기계공학부 교수



신영진 (申泳鎭)

1972년 5월생. 동의대학교 재료공학과 졸업, 동아대학교 교육대학원 기계교육학과 졸업, 현재 부경대학교 기계공학부 대학원(박사과정), 한국소방안전협회 부산지부 전임교수



김동욱 (金東旭)

1981년 10월생. 2005년 부경대학교 수산교육과 졸업(공학사), 현재 부경대학교 기계공학부 대학원(석사과정)