

< 논문 >

현가장치재 SUP-9강의 부식특성에 미치는 압축잔류응력의 영향에 관한 연구

박경동[†] · 유형주* · 안재필*
(2004년 10월 25일 접수, 2005년 4월 27일 심사완료)

A Study on the Effect of Compressive Residual Stress for Corrosion Property of SUP-9 Steel Using as Suspension Material

Keyung-dong Park, Hyung-Ju Ru, Jae-pil An

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Corrosion(부식), Corrosion Potential(부식전위), Corrosion Current(부식전류), Surface Roughness(표면조도), Corrosion Rate(부식속도)

Abstract

One of the useful technology for light-weightening of components required in the automobile and machine industry is to use of high strength materials. To improve material properties, carbonizing treatment, nitrifying treatment, and shot-peening method are representatively applied. However, the shot-peening method is generally used to remove the surface defect of steel and to improve the fatigue strength on surface. Benefits by shot peening are to make increase resistance against fatigue, stress corrosion cracking, fretting, galling, erosion and closing of pores. In this paper, investigated the effect of shot peening on the corrosion of SUP-9 steel immersed in 3.5% NaCl solution and corrosion characteristics by the heat treatment during shot peening process. The immersion test was performed on the four kinds of specimens. Corrosion potential, polarization curve, residual stress and etc. were investigated from the experimental results.

기호설명

mdd : 부식속도 측정
Ecorr : 부식전위
Icorr : 부식전류
SCE : 포화카르멜전극

1. 서론

최근 자동차, 선박, 철도차량, 항공기등과 같은

교통수단에 쓰이는 각 부품은 경량화라는 시대적 큰 물결 속에 알루미늄, 플라스틱 등의 경량재료 사용량이 지속적으로 조금씩 증가한 반면 철강재료의 사용량은 감소되고 있다. 이에 재료 표면의 침탄, 질화, 고주파 표면경화, 쇼트피닝에 의한 표면의 압축잔류응력의 부여 등과 같은 방법에 의해 철강 부품의 고강도 및 경량화를 실현하기 위한 노력이 이어지고 있다. 최근에는 고부가적이고, 청정기술로서 각광받고 있는 쇼트피닝 기술이 널리 사용되고 있다. 그러나 쇼트피닝과 관련된 연구가 피로특성 향상에 둔 경우가 대부분이고,⁽¹⁾ 현재 가속한 부식 환경조건 등에서 사용빈도가 점차 증가되어 가고 있는 추세로서 부식 생성기구에 관한 연구의 필요성의 증대되고 있다. 하지만 쇼트피닝에 의한 부식 생성기구 또는 부식 저항성에 따른 연구가 아직 국내에서는 전

[†] 책임저자, 회원, 부경대학교 기계공학부
E-mail : parkkd@pknu.ac.kr
TEL : (051)620-1592 FAX : (051)620-1592

* 회원, 부경대학교 기계공학부

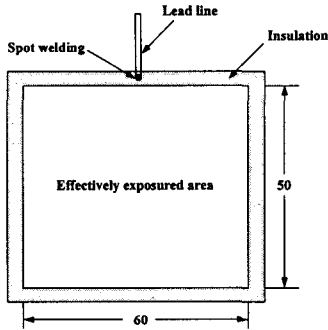


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자동차의 현가장치에 주로 사용되는 SUP-9강에 쇼트피닝

을 실시한 소재가 부식 환경하에서 어떠한 부식특성을 나타내는지 조사함으로써 부식생성기구와 압축잔류응력과의 관계를 규명하고자 하였다. 또한 일반적으로 열처리를 하면 산화물과 조직의 변화로 인해 부식을 활성화시킴으로써 오히려 불안정하게 된다. 그러나 쇼트피닝 가공에 있어서 열처리를 병행하면 피로강도가 향상된다는 연구⁽²⁾가 있으나 부식 환경에서의 내식성 향상에 대해서는 아직 알려진 바 없다. 따라서 쇼트피닝 가공에 있어 열처리 유무가 압축잔류응력의 형성 및 부식특성에 미치는 영향에 관해서도 연구하였다. 이러한 연구결과로 인해 부식에 의해 발생하는 경제적 손실을 줄이고, SUP-9강의 부식피트 생성에 미치는 영향을 규명함으로써 현가장치 최적설계를 위한 데이터베이스(database)를 구축 및 경량화 설계에 따른 비용절감을 이루고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 실험에 이용된 재료는 자동차 및 철도차량의 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 그 화학성분을 Table 1에 표시하였다. 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 50×60×12.5mm의 평판으로 하였고, 시험편의 종류로는 열처리 유무와 쇼트피닝의 유무에 따라 열처리 전 언피닝(NonHT & unpeened), 열처리 후 언피닝(HT & unpeened), 열처리 전 쇼트피닝(NonHT & shot-peened), 열처리 후

Table 1 Chemical compositions of SUP-9 steels [wt%]

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
JISG SUP-9	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-

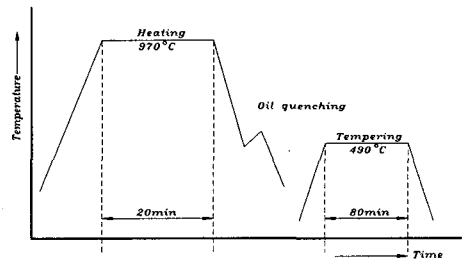


Fig. 2 Condition of heat-treatment

Table 2 Mechanical properties of SUP-9 steels after heat treatment

Materials	Tensile strength (MPa)	Hardness (HRC)		Elongation (%)
		After quenching	After tempering	
SUP-9(Non)	980	-	-	9
SUP-9(heat)	1350	57	44	9.4

쇼트피닝(HT & shot-peened)시험편으로 총 4가지 종류로 하였다. 열처리는 Fig. 2와 같은 조건으로 연속식 가스로에서 970°C, 유지시간은 20분간 가열한 후 퀴칭오일 40°C~80°C에서 5분간 담금질을 실시한 다음 다시 연속식 뜨임로에서 490°C로 80분간 유지하는 템퍼링을 하였다. 열처리가 완료된 시험편의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 로크웰 경도값(Ball diameter. : 10 mm, 하중: 3000 kg)이다.

2.2 쇼트피닝

시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 판스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 SUP-9강에 1단 쇼트피닝(1 stage shot peening)을 실시하였다. 또한 시험편 표면 전체에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위해 양면을 쇼트피닝 하였다. 쇼트피닝 가공은 Table 3과 같은 조건하에서 실시하였다.⁽³⁾

Table 3 Conditions of shot peened

Impeller Diameter (mm)	Shot Velocity (rpm)	Shot Ball Diameter (mm)	Arc Height (mm)	Cover-age (%)
490	2200	0.8	0.375	85

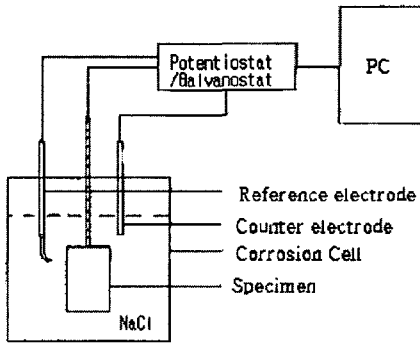


Fig. 3 Schematic diagram of polarization test equipment

2.3 실험장치 및 방법

부식속도를 측정하기 위한 방법에는 저마다 본질적인 이점을 가지고 있다. 따라서 본 실험에서는 재래식 방법에 의한 부식속도 결정의 방법인 무게 감량법과 단기간에 부식속도를 결정할 수 있고, 준연속적이기 때문에 많이 사용되는 양극 분극시험방법(Potentiodynamic polarization)을 동시에 사용하여 서로 비교하여 정리하였다.

2.3.1 부식액

부식액으로는 탈기처리(deaeration) 하지 않은 3.5% NaCl수용액(pH 8)을 사용하여 매 24시간마다 1회씩 부식전위와 부식전류를 측정하였고, 교체는 7일 간격으로 교체하였으며, 시험기간은 7, 14, 30일의 3가지로 하였다. 무게감소량은 시험완료 후 측정하였다.

2.3.2 실험방법

먼저 시험 전에 표면요철 및 산화피막을 제거하기 위해 4종류의 시험편을 모두 표면을 #100~2000까지의 에머리페이퍼로 경면연마를 실시한 후 아세톤으로 탈지시켰다. 침지시험에 있어서는 유효노출면적 50×60mm를 제외한 나머지 부분은 부식의 영향을 받지 않도록 하기 위해 실리콘 수지로서 피복절연 시켰다.

Table 4 Measuring condition of residual stress

X-Ray Diffraction	Condition	
	X-Ray Source	Target
	Voltage	30kV
	Current	10mA
Ø	0°, 15°, 30°, 45°	
2θ	140°~170°	
Diffraction	Scintillation Counter	

분극시험에 있어서는 시험편의 유효노출면적을 10 x 10mm로 하여 표면을 경면연마 시킨 후 아세톤으로 탈지하여 Fig. 3의 분극시험장치에 배선하였다. 분극 측정은 분극측정기(EG&G273A Potentiostat/Galvanostat)와 PC를 이용하여 부식소프트웨어(corrosion software)에 의해 측정을 하였다. 분극측정기의 기준전극(reference electrode)으로는 포화칼로멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을, 상대전극(counter electrode)으로는 2개의 고밀도 탄소봉을 사용하였으며, 주사속도(scan rate)는 0.167 mV/sec로 하였다. 침지시험 후의 표면의 요철상태는 표면조도계(KOSAKA, srfacorder SEF-30D)를 이용하여 측정하였다. 측정 칩의 선단반경은 2μm를 선택하여 측정하중은 1g으로 하고 종배율은 1000배, 횡배율은 50배로 하여 형상파일을 체크하였다.

쇼트피닝 가공에 의해 생성된 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포는 X-선 잔류응력측정기(RIGAKN-MASF2M)를 이용하여 측정하였다. 깊이방향의 잔류응력을 측정하기 위하여 전해연마기로 시험편의 측정부위를 10~20μm 단위로 연마해 가면서 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정계산방법은 2θ-sin²φ법⁽⁴⁾을 이용하였으며, 잔류응력의 측정조건은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식에 따른 압축잔류응력의 변화

침지시험 전의 SUP-9강에 열처리를 하지 않고 쇼트피닝한 시험편(Non-HT & shot peened)과 열처리 후 쇼트피닝한 시험편(HT & shot peened)의 압축잔류응력의 측정결과를 Fig. 4에 나타내었다. 실험결과를 보면 압축잔류응력이 열처리를 한 쇼트피닝 시험편이 대략 229.58MPa(약 1.54배)로 열처

리 하지 않은 시험편보다 높게 나타났다. 이것은

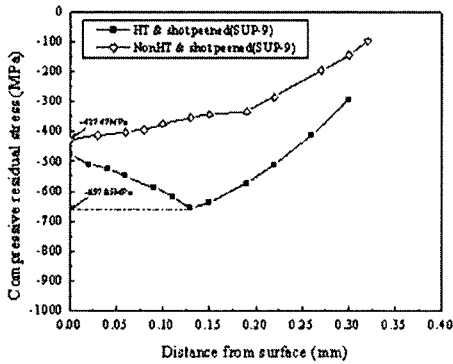


Fig. 4 Compressive residual stress distributions of shot peened SUP-9 steel before immersion test

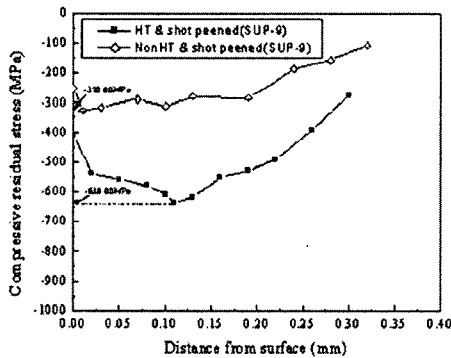


Fig. 5 Compressive residual stress distributions of shot peened SUP-9 steel after immersion test during 30 days

Table 5 Compressive residual stress change through immersion test

		NOT-HT & shot peened	HT & shot peened
Compressive Residual Stress	Before immersion test	427.47 MPa	657.05 MPa
	After immersion test	320.00 MPa	630.00 MPa
	Loss	107.47 MPa	27.05 MPa
	Flaking amount	0.012 mm	0.011 mm

열처리를 하면 표면부의 조직이 연화되어서 소성변형능력이 향상되어진다. 따라서 쇼트볼의 충돌시 더 큰 압축잔류응력을 형성한 것으로 생각된다. Fig. 5는 3.5% NaCl수용액에서 30일 침지시험 한 후의 압축잔류응력의 양상을 나타낸 것이다. 열처리 없이 쇼트피닝 가공한 시험편은 시험편 표면에서 내측으로 0.012mm에 최대 압축잔류응력값이 320MPa로 나타났고, 열처리 후 쇼트피닝 가공한 시험편은 침지시험 후 최대 압축잔류응력값이 시험편 표면 내측으로 0.115mm에 630MPa로 나타났다. 두 시험편의 부식전후 압축잔류응력과 표면박리량(flaking amount)을 정리하면 Table 5와 같이 나타내어진다. 이와 같이 압축잔류응력의 감소는 보호피막의 생성 시 발생하는 성장응력과 기존에 생성된 압축잔류응력과의 상호작용에 의해 압축잔류응력이 감소된 것으로 판단된다.

3.2 침지시험 후 무게감소량 및 표면조도변화

Fig. 6은 7, 14, 30일 동안 침지시험을 실시하여 얻어진 무게감소량을 측정 한 결과이다.

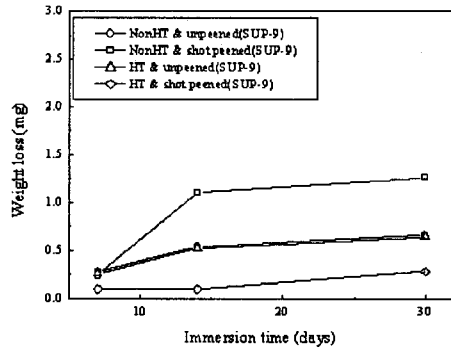


Fig. 6 Weight loss versus immersion time of specimens as immersed in 3.5% NaCl

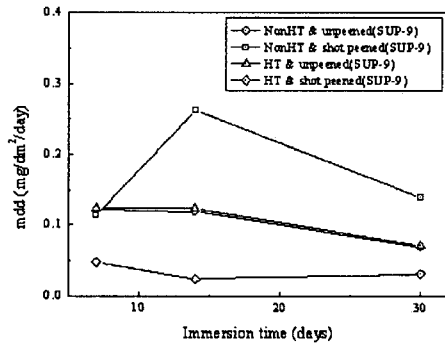


Fig. 7 Corrosion rate, mdd versus immersion time of specimens as immersed in 3.5% NaCl

무게감소량은 시험전에 중량을 측정하고 시험 후 부식생성물을 완전히 제거한 후에 중량변화로서 측정하였다. 실험결과를 보면 쇼트피닝 가공 전에 열처리과정을 추가하지 않았을 때는 무게감소량이 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편보다 더 큰 수치를 나타내었고, 열처리과정을 추가하였을 때에는 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편보다 낮은 수치를 나타내었다. 이것은 열처리 없이 쇼트피닝 가공을 했을 때는 쇼트볼의 충격에 의한 압축층이 불연속적이고 요철이 다소 거칠게 형성됨으로써 부식이 더 활성화 되는 요인으로 작용했기 때문이다. 반면에 열처리과정을 추가하였을 때는 연속적으로 분포되어 있는 압축잔류응력의 증가로 인해 부식에 대한 민감성이 감소한 것으로 생각된다. Fig. 7은 Fig. 6에 나타난 무게감소량을 부식속도를 나타내는 척도인 $mdd(mg/dm^2/day)$ 로 나타낸 것이다. 열처리 없이 쇼트피닝한 시험편이 처음 7일간은 급격히 증가하다가 시간이 경과함에 따라 언피닝 시험편에 근접하고 있음을 알 수 있다. 반면에 열처리 후 쇼트피닝한 시험편은 부식속도가 거의 일정한 값을 나타내고 있는데, 14~30일간의 기간에는 약간 증가하는 경향을 보

이고 있다. 이것은 시간의 경과와 더불어 쇼트피닝층이 용해되어져 내부로 갈수록 부식에 민감하게 반응하였기 때문으로 생각된다. 표면의 요철 상태를 측정하여 표면조도의 경향을 Fig. 8에 나타내었다. 이것은 4종류의 시험편의 침지시험 후 7일, 30일 후의 표면조도로서 표면조도계(KOSAKA, surfacorder SEF-30D)를 이용하여 측정하였다. 전반적으로 표면조도 값이 모두 열처리과정을 거치지 않은 시험편이 열처리 과정을 추가한 시험편에 비해 더 거칠게 나왔다. 시간경과에 따른 표면조도의 평균값(R_a) 변화에 있어서도 열처리 과정을 거치지 않은 시험편이 거칠게 나왔다. 즉 쇼트피닝 시험편의 경우 열처리 없이 쇼트피닝한 시험편의 경우는 약 1.3배($4.82 \mu m \rightarrow 6.27 \mu m$) 정도로 거칠어졌고, 열처리 후 쇼트피닝한 시험편의 경우는 1.01배($3.80 \mu m \rightarrow 3.83 \mu m$) 정도로 거칠어졌다. 또한 최대 표면조도(R_y) 값에 있어서는 열처리 없이 쇼트피닝한 시험편의 경우가 약 $10 \mu m$ 정도 증가하였고, 열처리 후 쇼트피닝한 시험편의 경우는 약 $1 \mu m$ 정도 감소하였다. 이로 인해 무게감소량에서 열처리 없이 쇼트피닝한 시험편이 부식에 의한 무게감량이 크게 나타

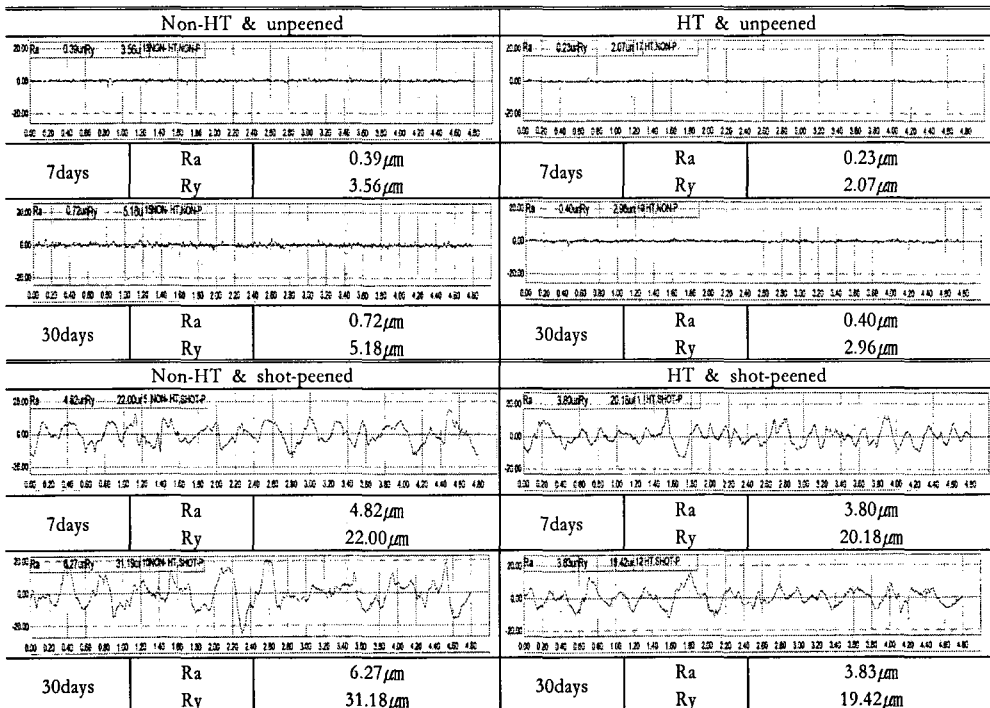


Fig. 8 Surface roughness of specimens immersed during 7, 30 days in 3.5% NaCl

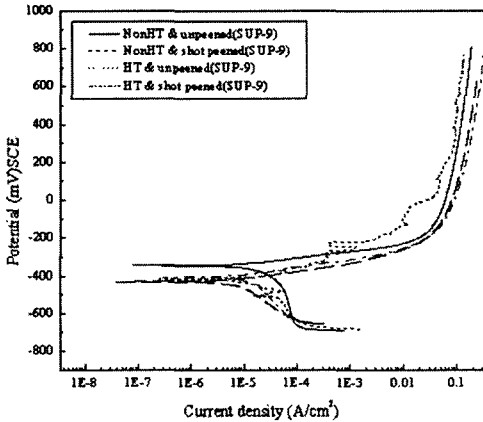


Fig. 9 Polarization curves of specimens

난 것으로 판단된다. 따라서 쇼트피닝 가공에 있어서 열처리 유무가 압축잔류응력형성과 내식성 향상에 끼치는 영향은 크다고 판단된다.

3.3 부식전위 및 부식전류의 변화

Fig. 9는 4종류 시험편에서 얻은 분극곡선을 나타내며 Tafel의삽법⁽⁵⁾을 이용하여 부식전위(E_{corr}) 및 부식전류밀도(I_{corr})를 구하였다. 각 시험편의 부식전위와 부식전류를 Table 6에 표시하였는데, 부식전위에 있어서 초기에는 열처리 없이 언피닝 시험편을 제외한 나머지 시험편은 모두 비슷하나, 열처리 후 언피닝 시험편이 다소 불안정한 양상을 보이며 부동태의 양상이 나타나고 있다. 부식전류는 Potential이 높아지면서 언피닝 시험편이 더 많은 전류가 흐름을 알 수 있다. 이는 3.5%의 NaCl을 함유한 용액에서는 Cl⁻ 이온의 영향에 의하여 부동태가 파괴되어지거나 철원소와의 직접적인 반응 식 (1)⁽⁶⁾과 같은 반응에 의해 전류가 증가된 것으로 보인다.

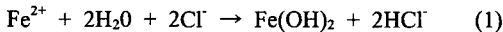


Fig. 10은 탈기처리하지 않은 3.5% NaCl수용액에 30일 동안 침지시켜 매 24시간마다 한번씩 측정된 부식전위의 변화를 나타내고 있다.

대체로 언피닝 시험편들은 부식전위가 (-)측 방향의 전위를 나타내고 있으나, 쇼트피닝 시험편들은 자연전위보다도 (+)측 방향의 전위를 나타내고 있다.

Table 6 Corrosive potential and corrosive current of specimens through Tafel extrapolation

	E _{corr} (mV/SCE)	I _{corr} (A/cm ²)
Non-HT & unpeened	-340	4.2×10 ⁻⁵
HT & unpeened	-410	2.7×10 ⁻⁵
Non-HT & shot-peened	-420	8×10 ⁻⁶
HT & shot-peened	-400	1.3×10 ⁻⁵

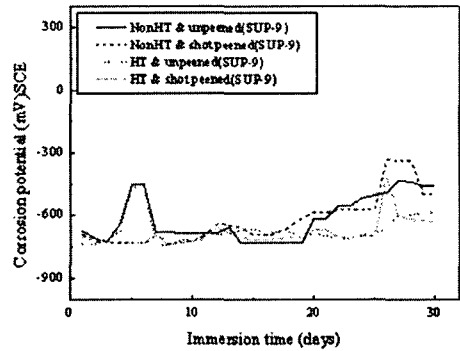


Fig. 10 Corrosion potential versus immersion time of specimens as immersed in 3.5% NaCl

여기서 부식전위의 변화는 산화피막의 형성과 더불어 피막내의 염소이온의 증가로 인해 부식전위가 증가 혹은 감소하는 경향을 보여주고 있다.⁽⁶⁻⁹⁾ 또한 열처리 유무에 따른 쇼트피닝 시험편에 있어서 결과를 보면 열처리 후 쇼트피닝 시험편의 경우가 시간이 경과할수록 (+)측방향의 전위를 형성하고 변화폭도 완만하다는 것을 알 수 있다. 이는 쇼트피닝 가공을 함으로써 모재의 보호층이나 부식피로균열에 대한 저항력을 높여 부식특성이 향상된 것으로 판단된다. 이는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력의 영향으로 보이며, 쇼트피닝 가공절차에 열처리 과정을 추가함으로써, 더 큰 압축잔류응력 형성과 내식성 향상을 꾀할 수 있다.

3.4 파단면의 특성

Fig 11~13은 7, 14, 30일 동안 침지시험 후 부식표면을 SEM 촬영(X1000배)한 사진을 나타내고 있다. 모든 시험편이 고탄소의 영향으로 공식에서 나타나는 혹 모양의 부식피트가 생성되었으나,⁽¹⁰⁾ 쇼트피닝 시험편의 경우 초기에는 쇼트볼의 충돌로 인해 표면상태가 불균일하기 때문에

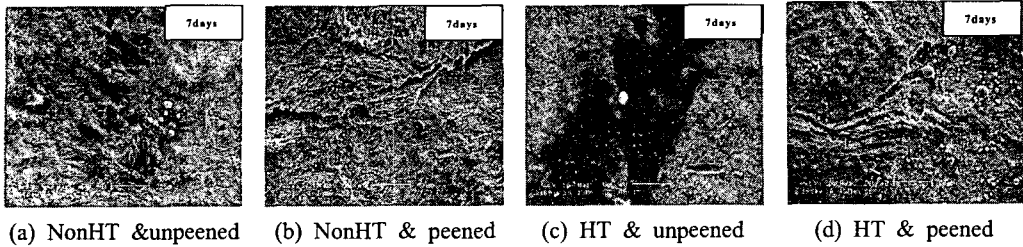


Fig. 11 SEM photographs of corroded surface for 7

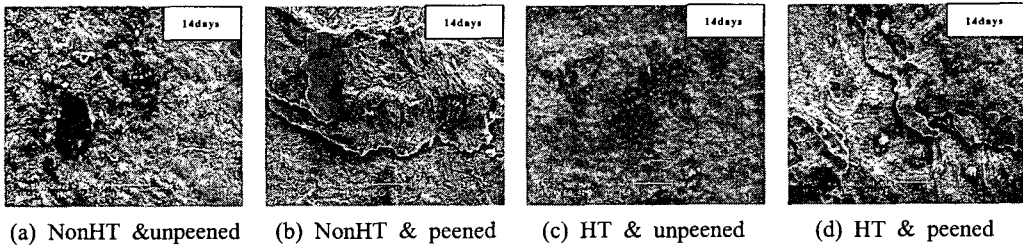


Fig. 12 SEM photographs of corroded surface for 14

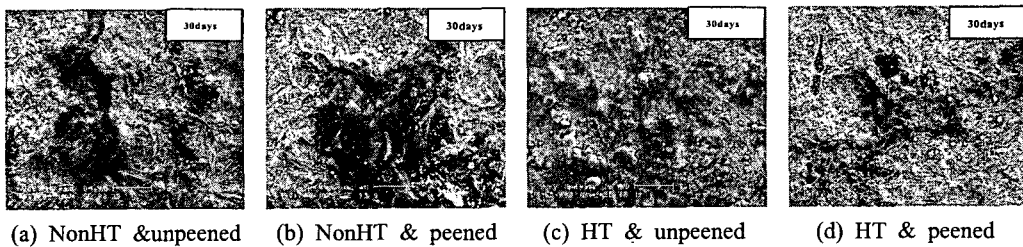


Fig. 13 SEM photographs of corroded surface for 30

연피닝 시험편보다 더 많은 부식피트가 생성되어 있음을 알 수 있다. 그러나 시간이 경과할수록 열처리 한 쇼트피닝 시험편은 표면이 균일하게 형성된 압축잔류응력장에 의해 부식진행이 더디게 이루어짐을 알 수 있다. 반면에 열처리를 하지 않은 쇼트피닝 시험편은 시간이 지날수록 표면요철로 인해 부식피트가 많이 생성되고, 이 부식피트가 성장하면서 염소이온 및 산소화산으로 인해 부식정도가 심해져서⁽¹¹⁾ 연피닝 시험편보다 부식이 활성화 되었다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

스프링강의 연피닝과 쇼트피닝 그리고 쇼트피닝가공에 있어 열처리과정의 추가여부에 따른 부식특성에 관한 실험을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 쇼트피닝가공에 있어서 열처리를 한 경우

표면조직의 완화로 인한 소성변형능력이 향상되어 더 높은 압축잔류응력이 나타났다.

(2) 표면조도의 경향에 있어서 쇼트피닝재가 연피닝재 보다 표면요철이 거친 것으로 나왔다. 또한 열처리 하지 않고 쇼트피닝한 시험편이 가장 거친 것으로 나왔고, 이로 인해 높은 무게감소량과 부식속도를 나타내었다.

(3) 분극특성에 있어서는 연피닝재가 쇼트피닝재보다 더 활성화된 (-)측방향의 부식전위를 나타내었고, 부식전류는 쇼트피닝재에 비해 더 높은 부식전류를 나타내었다. 이는 쇼트피닝에 의해 모재의 보호층이나 부식피로 균열에 대한 저항력을 높여 부식특성이 향상된 것으로 보인다. 부식전위의 변화에 있어서는 쇼트피닝재가 연피닝재보다 비활성방향의 전위를 형성하고, 쇼트피닝재의 경우 열처리 과정을 추가함으로써 완만한 부식전위의 변화폭을 나타내었다.

(4) 침지시험 후 부식표면은 SEM으로 촬영한

결과 시간이 경과할수록 언피닝재가 쇼트피닝재보다 부식피트가 많이 생성되어 표면부식정도가 증가하는 양상을 나타내었다. 또한 쇼트피닝재의 경우 열처리를 하지 않은 시험편은 더 많은 부식피트의 생성으로 언피닝보다 표면부식정도가 증가하는 양상을 나타내었다.

참고문헌

- (1) Tange, A. and Takamura, N., 1990, "Relation Between Shot-peening Residual Stress Distribution and Fatigue Crack Propagation Life in Spring Steel," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Vol. 1, Tokyo, pp. 243~253.
- (2) Cheong, S. K., Lee, S. H. and Chung, S. C., 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," *Transaction of the KSME A*, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.
- (3) Park, K. D. and Jung, C. G., 2003, "The Effect of Compressive Residual Stresses of Two-stage Shot-peening for Fatigue life of Vehicle Spring Steel," *Transactions of the KSAE*, Vol. 11, No. 1, pp. 185-192.
- (4) ASTM, 1994 "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress" ASTM E 1426-94, pp. 932~935.
- (5) Fontana, M. G., 1986, "Corrosion Engineering," 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York.
- (6) Jones, D. A., 1995, "Principles and Prevention of Corrosion" 2nd Edition, Prentice Hall Company, New Jersey.
- (7) Lim, U. J. and Yun, B. D., 2001, "Study on the Crevice Corrosion Behavior of SS400 in Marine Environment," *KOSME*, Vol. 25, No. 6, pp. 1336~1340.
- (8) Lim, U. J. and Han, G. S., 2000, "Study on the Characteristics of Crevice Corrosion for STS304 Austenitic Stainless Steel(I)," *KAOAS*, Vol. 36, No. 1, pp. 66~72.
- (9) Gibson, F. W., 1987, "Corrosion, Concrete, and Chlorides," *ACISP* 102, pp. 13, 107, 155, 161.
- (10) Wraglen, G., 1972, "An Introduction to Corrosion and Protection of Metals," Institut for Metallskydd, Stockholm.
- (11) Greene, N. D., 1961, "Metallic Corrosion," Butterworths, London.