

차량용 스프링강재의 압축잔류응력이 부식에 미치는 영향

박 경 동* · 안 재 필

부경대학교 기계공학부

The Effect of Compressive Residual Stress of Spring Steel for Vehicle on Corrosion

Keyungdong Park* · Jaepil An

Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea
(Received 8 July 2004 / Accepted 30 October 2004)

Abstract : Shot peening can be defined as the process of work hardening of the surface of components by means of propelled stream of spherical shot. Benefits due to shot peening are increase in resistance to fatigue, stress corrosion cracking, fretting, galling, erosion and closing of pores. In this study, the influence of shot peening on the corrosion was investigated on spring steel immersed in 3.5% NaCl. The immersion test was performed on the two kinds of specimens. Corrosion potential, polarization curve, residual stress and etc. were investigated from experimental results. From test results, the effect of shot peening on the corrosion was evaluated. The important results of the experimental study on the effects of shot peened spring steels on the environment corrosion are as follows;

In case of corrosion potential, shot peened specimen shows more activated negative direction as compared with parent metal. Surface of specimen, which is treated with the shot peened, is placed as more activated state against inner base metal. It can cause the anti-corrosion effect on the base metal.

Key words : Shot peening(쇼트피닝), Compressive residual stress(압축잔류응력), Corrosion(부식), Immersion test(침지시험), Polarization curve(분극곡선), Weight loss(무게감소), Corrosion potential(부식전위)

1. 서론

최근 기계, 항공기, 자동차 산업 등에서는 신소재 개발과 재료의 고응력화, 경량화를 요구하고 있다. 따라서 부품에 사용되는 재료, 특히 철강재는 고강도화 되어야 한다는 것이 필수적인 사항이 되고 있다.^{1,2)}

이러한 고강도화를 실현하기 위한 수단으로 침탄 처리, 질화처리, 쇼트피닝가공법이 대표적으로 적용되고 있으나, 현재는 표면부에 압축잔류응력을

부여하여 피로강도를 높이는 가공방법으로 쇼트피닝 가공이 널리 쓰이고 있다. 쇼트피닝에 의해 생성된 압축잔류응력은 피로강도에 큰 영향을 미치며, 이와 관련된 연구가 많이 행하여져 오고 있다. 하지만 쇼트피닝에 따른 부식생성기구에 대한 연구는 아직 전무한 실정이다. 왜냐하면 부식환경하에서의 피로강도는 반복하중이나 반복변형에 의한 기계적인 피로현상과 부식에 의한 금속의 용해가 복합되어 작용되는 복잡한 파괴기구로서 단순히 중첩시켜서 평가할 수 없기 때문이다.³⁾

쇼트피닝가공에 의한 효과는 응력부식저항에도 탁월한 효과가 있음이 연구되어지고 있고 부식환경

*To whom correspondence should be addressed.
parkkd@pknu.ac.kr

하에서도 피로수명이 증가가 된다는 보고가 있다.^{4,6)} 쇼트피닝 가공을 하게 되면, 표면전체가 압축 잔류응력 상태가 됨으로서 균일한 응력상태에 놓이게 된다고 볼 수 있다. 균일한 응력상태에서는 국부전지에 의한 부식셀의 형성이 감소된다. 응력상태가 현저하게 다른 상태가 재료에 발생할 경우 재료에는 상이한 응력들이 공존하게 되며, 응력이 많이 걸린 부분이 양극으로 작용하여 국부전지에 의한 부식의 진행이 활성화되어 질 것이다.^{7,9)}

따라서, 본 논문에서는 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 표면전체에 생성되었을 경우, 그것이 피로강도 및 부식피로강도 등에 미치는 영향을 파악하기 위한 초기단계로서 스프링강에 쇼트피닝을 실시한 소재가 부식환경하에서 어떠한 부식특성을 나타내는지를 조사하였다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 부식 시험편

본 실험에 이용된 재료는 자동차 및 철도차량의 현가장치에 주로 사용되어지고 있는 스프링강(JISG SUP-9)이며, 그 화학성분을 Table 1에 표시하였고, 시험편의 기계적 성질을 Table 2에 표시하였다.

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

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

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

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

이 기계적 성질은 열처리 한 후의 결과이며, Fig. 1 과 같은 조건으로 연속식 가스로서 970°C, 유지시간은 20분간 가열한 후 퀴칭오일 40°C~80°C에서 5분간 담금질을 실시한 다음 다시 연속식 뜨임로에서 490°C로 80분간 유지하는 템퍼링을 하였다. 경도는 표면으로부터 100 μm 깊이의 로크웰 경도값(Ball

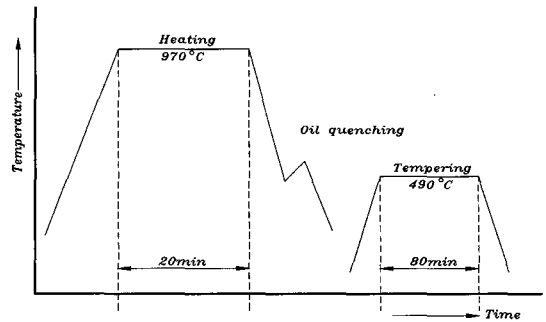


Fig. 1 Condition of heat-treatment

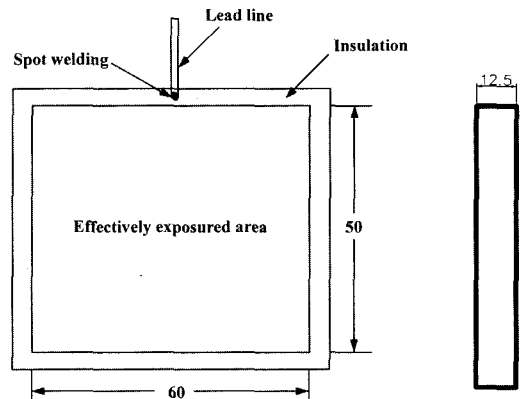


Fig. 2 Shape and dimensions of specimen

diameter. : 10 mm, 하중: 3000 kg)이다.

침지시험에 사용된 시험편은 50 x 60 x 12.5mm의 평판으로 하였고, 언피닝(unpeened), 쇼트피닝(shot peened) 두 가지 종류로 하였다. 또한 부식전위를 측정하기 위해 Spot용접을 실시하였다. 이상과 같은 조건으로 제작된 시험편의 형상과 치수를 나타낸 그림이 Fig. 2이다.

2.2 시험편의 압축잔류응력

시험편에 압축잔류응력을 부여하기 위해 판스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 스프링강에 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.¹⁰⁾

2.3 실험장치 및 방법

침지시험에 있어서 시험편은 모두 표면을 #100~

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 |

2000까지의 에머리페이퍼로 경면연마를 실시한 후 아세톤으로 탈지시켰다. 또한 유효노출면적 50×60mm을 제외한 나머지 부분은 부식의 영향을 받지 않도록 하기 위해 실리콘 수지로서 피복절연 시켰다.

부식용액으로는 용존산소를 제거하지 않은 3.5% NaCl수용액(pH 8)을 사용하여 매 24시간마다 1회씩 부식전위와 부식전류를 측정하였고, 교체는 7일 간격으로 교체하였으며, 시험기간은 7, 14, 30, 60일의 4가지로 하였다. 무게감소량은 시험완료 후 측정하였다. 또한 침지시험 후의 표면요철상태를 조사하기 위해 표면조도계(KOSAKA, srfacorder SEF-30D)를 이용하였다. 측정침의 선단반경은 2 μ m를 선택하여 측정하중은 1g으로 하고 종배율은 1000배, 횡배율은 50배로 하여 형상파일을 체크하였다.

분극시험에 있어서는 비파괴적이고, 실험시간이 짧아 많이 이용되는 양극분극(Potentiodynamic Polarization) 시험을 실시하였다. 분극실험장치는 분극 측정기(EG&G273A potentiostat/Galvanostat)와 PC를 이용하여 부식소프트웨어(corrosion software)에 의해 분극측정을 하였다. 분극측정기의 기준전극(reference electrode)으로는 포화카르멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을, 상대전극(counter electrode)으로는 2개의 고밀도 탄소봉을 사용하였으며, 주사속도(scan rate)는 0.167 mV/sec로 하였다. 분극 시험은 시험편의 유효노출면적을 10 x 10 mm로 하여 표면을 경면연마 시킨 후 아세톤으로 탈지하여 Fig. 3의 분극시험장치에 배선하였다.

또한, 쇼트피닝에 의한 시험편 표면의 잔류응력의 분포를 알아보기 위하여 X-선 잔류응력측정기(RIGAKN-MASF2M)를 이용하였다. 깊이방향의 연속적인 잔류응력을 구하기 위해서는 표면부를 제거해야 하는데, 이때 기계가공이나 사포연마 등에 의하여 표면부를 제거하면 잔류응력이 발생하여 정확하게 측정을 할 수 없다. 따라서 잔류응력을 발생하

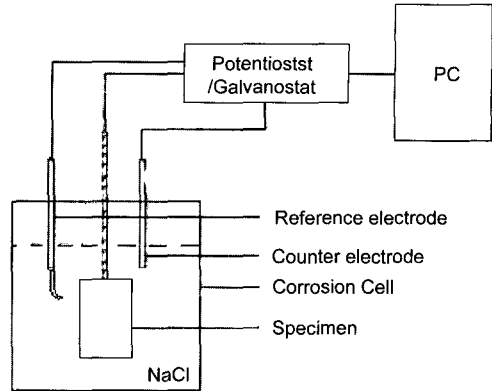


Fig. 3 Schematic diagram of potentiodynamic polarization

Table 4 Measuring condition of residual stress

| X-Ray diffraction | Condition | |
|-------------------|-----------------------|------|
| | Target | Cr-V |
| X-Ray source | Voltage | 30kV |
| | Current | 10mA |
| θ | 0°, 15°, 30°, 45° | |
| 2 θ | 140° ~ 170° | |
| Diffraction | Scintillation counter | |

지 않기 위해 전해연마기로 시험편의 측정부위를 10~20 μ m 단위로 연마해 가면서 잔류응력을 측정하였다. 잔류응력 측정계산방법은 $2\theta - \sin^2\psi$ 법을 이용하였으며, 잔류응력의 측정조건은 Table 4와 같다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 압축잔류응력의 양상

Fig. 4는 스프링강에 쇼트피닝 가공한 시험편(shot peened)의 침지시험 전과 60일 침지시험 후의 압축잔류응력의 값의 변화를 나타내었다. 침지시험 전의 경우 시험편의 표면으로부터 내측 0.13mm에 657.05 MPa의 최대 압축잔류응력값을 나타내었으며, 점차 감소하여 표면으로부터 내측 0.3mm까지 압축 잔류응력이 분포되어 있었음을 알 수 있다. 침지시험 후의 결과는 최대 압축잔류응력값이 시험편 표면 내측으로 0.115mm에 630.00 MPa값이 분포되었다. 그 이후의 값은 부식전과 동일하게 감소하다 0.3mm까지 압축잔류응력이 분포되었다. 즉 시험편의 부식전후를 정리하면 부식전 최대깊이 0.13mm에서

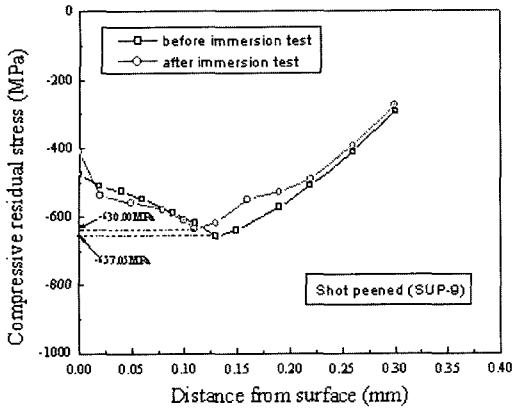


Fig. 4 Compressive residual stress distributions of shot peened SUP-9 steel before and after immersion test during 60 days

657.05 MPa 이고, 부식 후 최대깊이 0.119mm에서 630.00 MPa이다. 60일 동안 압축잔류응력의 크기는 27.05 MPa만큼 감소하고, 박리량은 0.011mm 정도인 것을 알 수 있었다.

3.2 분극거동의 양상

Fig. 5는 두 시험편에서 얻은 분극곡선을 나타내며 Tafel외삽법⁹⁾을 이용하여 부식전위(E_{corr}) 및 부식전류밀도(I_{corr})를 구하였다. 언피닝 시험편(un-peened)은 부식전위와 부식전류가 -410 (mV)SCE 및 $2.7 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 을 나타내었고, 쇼트피닝 시험편(shot peened)은 부식전위가 -400 (mV)SCE이고 부식전류는 $1.3 \times 10^{-5} \text{ A/cm}^2$ 을 나타내었다. 초기에는 3.5% NaCl의 용액에서 두 시험편 모두 비슷하나 Potential이 높아지면 언피닝 시험편이 더 많은 전류가 흐름을 알 수 있고, 또한 전체적으로 다소 불안정한 양상을 보이며 부동태의 양상이 나타나고 있다. 이는 3.5%의 NaCl을 함유한 용액에서는 Cl^- 이온의 영향에 의하여 부동태가 파괴되어지거나 철원소와의 직접적인 반응식 (1)¹²⁾과 같은 반응에 의해 전류가 증가된 것으로 보인다.



따라서 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력이 모재의 보호층이나 부식피로 균열에 대한 저항력을 높여서 부식특성이 향상된 것으로 생각된다.

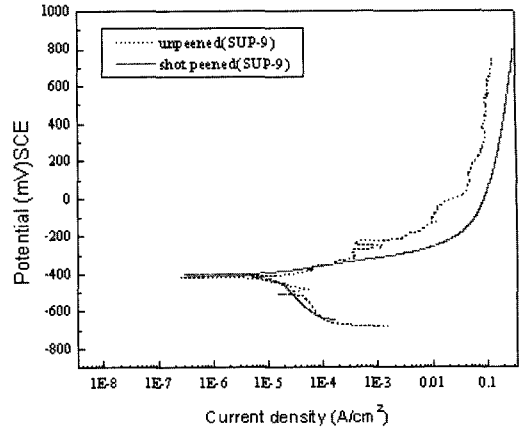


Fig. 5 Polarization curves of unpeened and shot peened specimens

3.3 부식전위의 변화

Fig. 6은 용존산소를 제거하지 않은 3.5% NaCl수용액에 60일 동안 침지시켜 매 24시간마다 한번씩 측정된 부식전위의 변화를 나타내고 있다.

언피닝 시험편의 경우 5일째부터 귀한방향(+측 방향)으로 급속한 변화를 보이다가 다시 비한방향(-측 방향)으로 이행하는 모습을 보여주고 있다. 이후 40일까지 비교적 진폭의 변화가 안정된 모습을 보여주고 있다. 반면에 쇼트피닝 시험편은 26일을 전후로 귀한방향에서 비한방향으로의 급속하게 이행하는 모습을 보여주고 있다. 여기서 귀한방향으로의 이행은 부식진행에 따른 산화피막의 형성으로

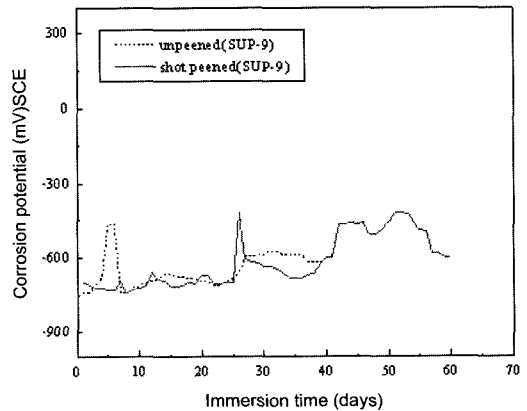


Fig. 6 Corrosion potential versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

양분극의 증대로 인한 것이고, 비한방향으로의 이행은 이 피막이 떨어져 나감으로써 다시 부식이 활성화되어 나타난 것으로 생각된다.¹³⁾

따라서 이러한 결과차이는 쇼트피닝에 의한 압축층이 연속적으로 분포되어 있고, 또한 압축잔류응력의 증가로 인해 부식에 대한 민감성이 감소하였기 때문이라고 생각된다.

3.4 무게감소량 및 부식속도

Fig. 7은 7, 14, 30, 60일 동안 침지시험을 실시하여 얻어진 무게감소량을 측정된 결과이다. 무게감소량은 시험전에 중량을 측정하고 시험 후 부식생성물을 완전히 제거한 후에 측정하였다. 전반적으로 무게감소량은 쇼트피닝 시험편이 덜 부식되고 있는 것으로 나타났다. 그러나 쇼트피닝 시험편의 경우 시간이 경과할수록 무게감소량이 증가하는 현상이 나타났다. 이것은 시간의 경과와 더불어 쇼트피닝층이 용해되어져 내부로 갈수록 부식에 민감하게 반응하였기 때문으로 생각된다.

표면의 요철상태를 조사하여 표면조도의 경향을 Table 5에 나타내었다. 이것은 두 종류 시험편의 침

지시험 후 7일, 30일 후의 표면조도로써 표면조도계(KOSAKA, surfacorder SEF-30D)를 이용하여 측정하였다. 표면조도의 평균값(Ra)에 있어서는 초기에 쇼트피닝 시험편이 3.80 μm 으로 언피닝 시험편에 비해 약 16배정도로 거칠었고, 최대 표면조도값(Ry)에 있어서는 9배정도로 거칠었다. 시간경과에 따른 결과를 보면 언피닝 시험편의 경우는 약 1.7배(0.23 μm →0.40 μm)로 거칠어졌고, 쇼트피닝 시험편의 경우는 약 1배(3.83 μm →3.83 μm)로 거칠어졌다. 또한 최대 표면조도값에 있어서는 언피닝 시험편은 증가한 반면 쇼트피닝 시험편은 감소하였다.

Fig. 8은 Fig. 7에 나타난 무게감소량을 부식속도로 나타낸 것이다. 종축에는 부식속도의 척도로서 mdd(mg/dm²/day)를 나타낸다. 전반적으로 쇼트피닝 시험편이 낮은 부식속도를 나타냈다. 언피닝 시험편의 경우는 무게감소량이 급격하게 증가했던 구간에서 부식속도가 높게 나타났고, 시간이 경과할수록 감소해가는 추세를 나타내었다. 반면에 쇼트피닝 시험편은 시간이 경과할수록 거의 일정한 값을 보이고 있다. 이상의 결과로부터, 쇼트피닝 시험편은 그렇지 않은 시험편에 비해 방식효과가 있다고 생각되며, 그것은 압축잔류응력의 영향 때문이라고 생각한다.

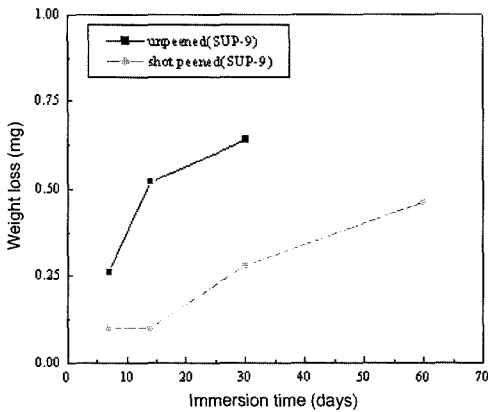


Fig. 7 Weight loss versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

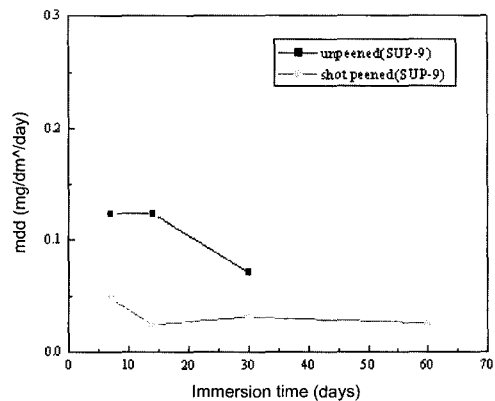


Fig. 8 Corrosion rate, mdd versus immersion time of unpeened and shot peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

Table 5 Surface roughness of specimens immersed during 7, 30days in 3.5% NaCl

| Time | Unpeened | | Shot-peened | |
|--------|--------------------|--------------------|--------------------|---------------------|
| | Ra | Ry | Ra | Ry |
| 7days | 0.23 μm | 2.07 μm | 3.80 μm | 20.18 μm |
| 30days | 0.40 μm | 2.96 μm | 3.83 μm | 19.42 μm |

3.5 부식표면

Fig. 9~11은 7, 14, 30일 동안 침지시험 후 부식표면을 X1000배로 관찰한 SEM사진을 나타내고 있다.

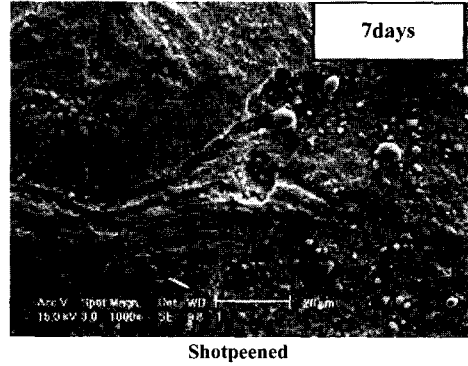
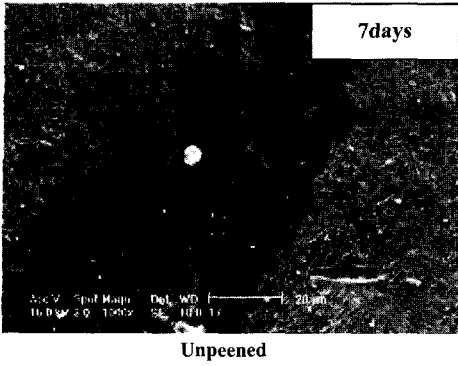


Fig. 9 SEM photographs of corroded surface for 7days

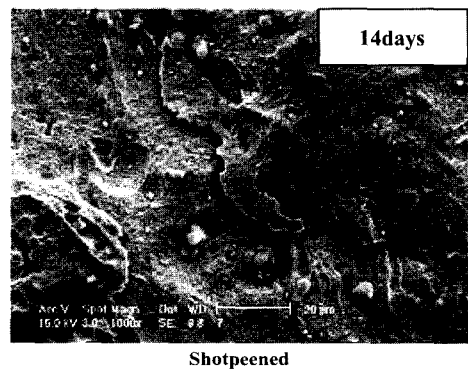
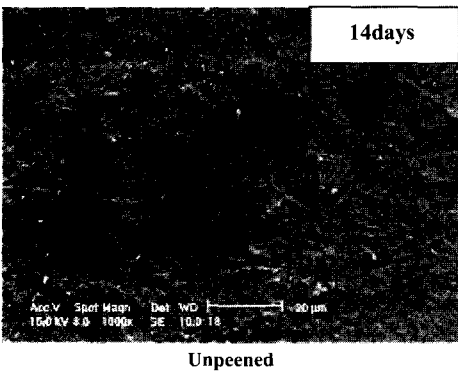


Fig. 10 SEM photographs of corroded surface for 14days

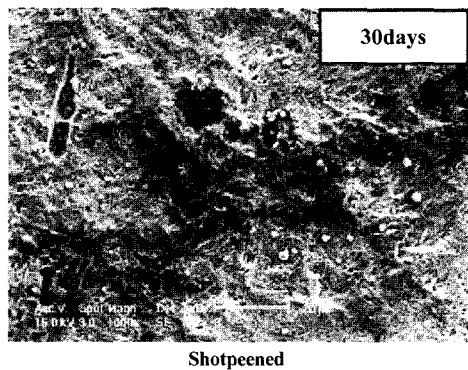
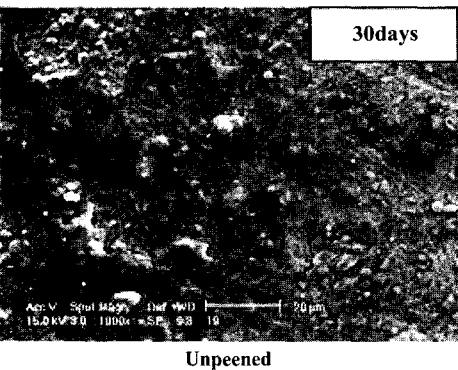


Fig. 11 SEM photographs of corroded surface for 30days

쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편의 비교에서 초기에는 쇼트피닝의 경우가 앞서 서술한 표면거칠기의 결과에 따라 표면의 요철로 인해 표면 부식정도가 약간 증가하나 시간이 경과할수록 언피닝 시험편의 표면부식정도가 쇼트피닝에 비해 크게 증가하

고 있다는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 중량감소량의 증가경향과 일치하는 것을 알 수 있다. 이것은 쇼트피닝시 표면에 요철이 형성되지만 유효한 압축응력장의 효과로 인해 거칠기의 부정적인 면이 상쇄되어 부식에 덜 민감한 것으로 생각된다.

4. 결 론

연피닝 시험편과 쇼트피닝 시험편의 부식환경에 관한 실험을 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 분극시험에 있어서 부식전위는 연피닝 시험편이 쇼트피닝 시험편보다 더 활성화된 (-)측 방향을 나타내었고, 부식전류는 쇼트피닝재가 연피닝재에 비해 더 낮은 전류값을 나타내었다. 이는 쇼트피닝에 의해 모재의 보호층이나 부식피로 균열에 대한 저항력을 높여 부식특성이 향상된 것으로 보인다.
- 2) 부식전위 변화에 있어서는 쇼트피닝재가 연피닝재보다 비환방향에서 귀환방향으로의 이행이 늦게 나타나서 쇼트피닝에 의한 압축잔류응력이 부식의 활성화를 억제하는 것으로 보인다.
- 3) 부식속도 및 무게감소량에 있어서는 쇼트피닝재가 연피닝재보다 낮은 수치를 나타내었다. 이는 압축잔류응력의 증가로 인해 부식에 대한 민감성이 감소하였기 때문으로 생각된다.
- 4) 침지시험후 부식표면을 SEM으로 촬영한 결과 시간이 경과할수록 연피닝재가 쇼트피닝재보다 부식피트가 많이 생성되어 표면부식정도가 증가하는 양상을 나타내었다.

References

- 1) K. D. Park, J. H. Kim, H. K. Youn and W. J. Park, "Fatigue Crack Propagation Characteristics in SA 516/70 Steel for Pressure Vessels at High Temperature," KCORE, Vol.15, pp.105-110, 2001.
- 2) W. F. Brown and J. E. Strawley, "Plane Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," ASTM STP 410, 1996.
- 3) Y. Maeda, A. Ohta and N. Suzuki, "Fatigue Properties in Synthetic Sea Water by $\sigma_{max}=\sigma_y$ Testing Method," Quar. J. JWS, Vol.19, No.2, pp.360-364, 2001.
- 4) M. P. Muller, C. Verpoort and G. H. Gessinger, "The Influence of Shot Peening on the Fatigue and Corrosion Fatigue Behavior of an Austenitic-Ferritic Stainless Steel," Proc. of the 1st Int. Conf. on Shot Peening, Vol.1, Paris, pp.479-484, 1981.
- 5) D. Kirt and M. Jarrett, "Influence of Shot Peening on Fatigue and Corrosion-Fatigue Behavior of Structural Steel," Proc. of the 4th Int. Conf. on Shot Peening, Vol.1, Tokyo, pp.133-142, 1990.
- 6) W. Koehler, "Influence of Shot Peening with Different Peening Materials on the Stress Corrosion and Corrosion Fatigue Behavior of a Welded AlZnMg-Alloy," Proc. of the 2nd Int. Conf. on Shot Peening, Vol.1, pp.126-132, 1984.
- 7) R. W. Staehle, A. J. Forty and D. Rooyen, "Fundamental Aspects of Stress Corrosion Cracking," Proc. of Conf. on Stress, Columbus, The Ohio State Univ., 1967.
- 8) 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.
- 9) M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York, 1986.
- 10) 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 the KSAE, Vol.11, No.1, pp.185-192, 2003.
- 11) ASTM, "Standard Test Method for Determining The Effective Elastic Parameter for X-ray Diffraction Measurement of Residual Stress," ASTM E 1426-94, pp.932-935, 1994.
- 12) D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion 2nd Edition, Prentice Hall Company, New Jersey, 1995.
- 13) F. W. Gibson, "Corrosion, Concrete, and Chlorides," ACISP 102, pp.13, 107, 155, 161, 1987.