

## 쇼트피닝 가공 스프링강의 압축잔류응력이 부식에 미치는 영향

박 성 모<sup>1)</sup> · 문 광 석<sup>2)</sup> · 박 경 동<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>부경대학교 대학원 컴퓨터공학과 · <sup>2)</sup>부경대학교 전자공학부 · <sup>3)</sup>부경대학교 기계공학부

## The Effect of Compress Residual Stress on Corosion of the Shot Peened Spring Steel

Sung-Mo Park<sup>1)</sup> · Kwang-Seok Moon<sup>2)</sup> · Keyong-dong Park<sup>\*3)</sup>

<sup>1)</sup>Department of Computer Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>2)</sup>Department of Electronics Engineering, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

<sup>3)</sup>Department of Mechanical Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

(Received 8 May 2007 / Accepted 4 October 2007)

**Abstract :** The compressive residual stress due to shot peening process can increase the intrinsic fatigue strength of surface and therefore would be beneficial in reducing the probability of fatigue damage. However, it was not known that the effect of shot peening on corrosion environment. In this study, the influence of shot peening and corrosion condition on corrosion property was investigated on immersed in 3.5% NaCl, 10% HNO<sub>3</sub> + 3% HF, 6% FeCl<sub>3</sub>. The immersion test was performed with two kind of specimens. The immersion test periods were carried out on performed 360days. Corrosion potential and weight loss were investigated from experimental results. From these results, the effect of shot peening on the corrosion characteristics was evaluated.

**Key words :** Shot peening(쇼트피닝), Corrosion(부식), Corrosion potential(부식전위), Weight loss(무게감소량), Compressive residual stress(압축잔류응력)

### 1. 서 론

최근 산업기술의 고도화에 의해 금속의 고강도화가 요구되어지고 있고, 가혹한 부식 환경조건 등에서의 사용빈도가 점차 증가되어가고 있는 추세이다.<sup>1,2)</sup> 이에 기계재료도 내식성, 내열성, 고인성 및 고강도 등이 요구되고 있는 것이 현실이다. 그러나 부식이나 안전성 때문에 고가의 내식성 재료를 사용하거나 필요 이상의 고강도 재료를 사용함으로써 경제적인 측면에서 많은 문제점을 갖고 있다. 따라서 경제적인 절약과 고강도화를 실현하기 위한 방법으로 쇼트피닝에 의한 방법이 널리 쓰이고 있다.

그 이유는 쇼트피닝은 특수가공기술로서 경량화, 고강도화를 통하여 에너지 절약을 꾀할 수 있어 청정기술로 적용될 수 있고 매우 고부가적인 산업이기 때문이다.<sup>3)</sup> 지금까지 자동차 및 철도차량의 소재로 많이 사용되고 있는 SAE 5155의 피로특성 향상에 관한 연구는 활발히 전개되어지고 있다. 그러나 쇼트피닝에 따른 부식 생성기구 또는 부식저항성에 대한 연구는 국내에서는 전무한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 자동차나 철도의 현가장치 재료로 사용되고 있는 스프링강에 쇼트피닝 가공을 실시하여 세 가지 부식 용액(6% FeCl<sub>3</sub>수용액, 10% HNO<sub>3</sub> + 3% HF수용액, 3.5% NaCl수용액)에서의 압축잔류응력과 부식생성 기구해석 및 공식(6% FeCl<sub>3</sub>,

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

수용액)과 입계부식(10%  $\text{HNO}_3$  + 3% HF수용액)에서의 쇼트피닝의 효과에 대해서 알아보고자 한다.

이러한 연구결과를 통해 부식 환경에서의 부식으로 인한 손상을 줄이고, 각종 부품이나 구조물의 설계 시 피로수명 평가자료로 활용을 함으로써 안전 설계에 기여하고자 한다.

## 2. 시험편 및 실험방법

## 2.1 시험편

본 실험에 사용된 시험편은 와이어로드 상태의 압연 스프링강(SAE 5155)이며, Table 1에 화학적 성분을 나타내었고, Table 2는 열처리(Quenching & Tempering)한 시편의 기계적 성질로서, 연속식가스로에서 970°C, 유지시간은 20분간 가열한 후 퀸칭오일 40~80°C에서 5분간 담금질을 실시하였고, 연속식 뜨임로에서 490°C로 80분간 유지하는 템퍼링을 시행하였다.

침지시험에 사용된 시험편은 CT시험편으로 하였고, 그 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다. 또한, Fig. 2에 나타낸 그림과 같이 시험편의 쇼트피닝 유무에 따라 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편 두 가지 조건으로 시험하였다.

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

Material	Tensile strength (MPa)	Rockwell Hardness (HRC)		Elongation (%)
		After quenching	After tempering	
SAE 5155	1350	57	44	9.4

## 2.2 쇼트피닝가공

쇼트피닝 가공은 팬스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 Table 3과 같은 조건하에서 실시하였으며 시험편 표면에 균일한 쇼트피닝 가공면을 얻기 위해 양면을 쇼트피닝 가공하였다.<sup>4)</sup>

### 2.3 실험장치 및 실험방법

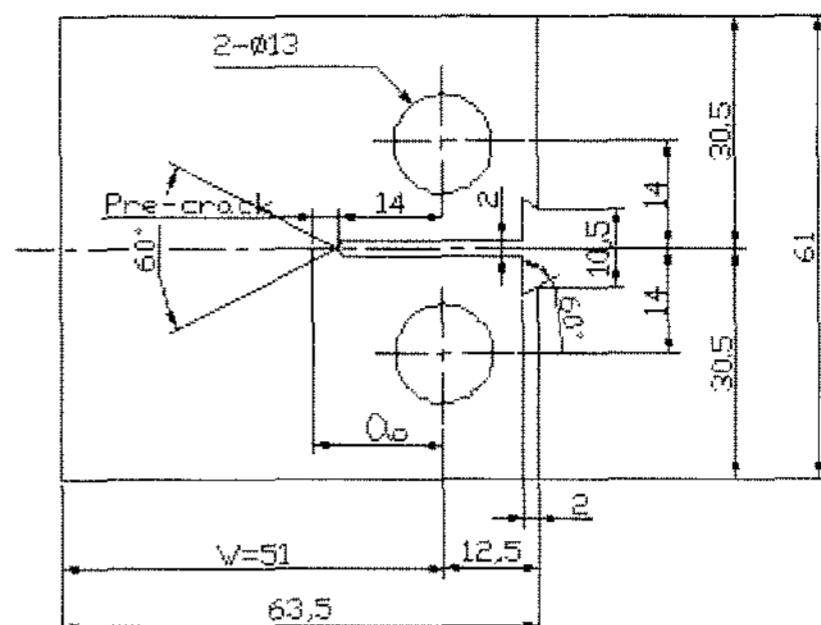


Fig. 1 Shape and dimensions of specimen

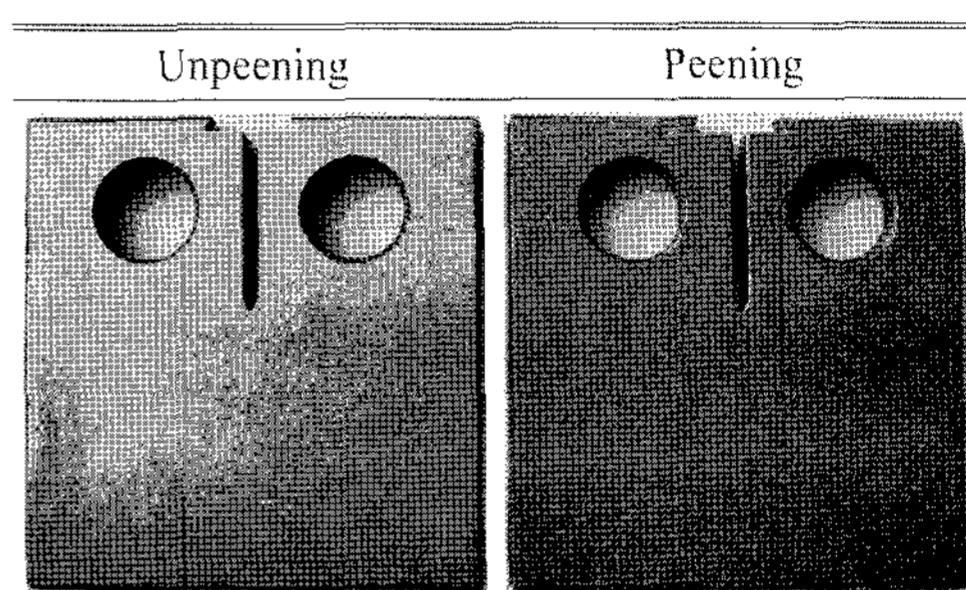


Fig. 2 Shapes of specimens

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

부식수용액은 부식형태 중 공식과 입계부식 그리고 일반해수환경에서의 쇼트피닝 효과를 알아보기 위해 용존산소를 제거하지 않은 6%  $\text{FeCl}_3$  수용액, 10%  $\text{HNO}_3 + 3\%$  HF수용액, 3.5%  $\text{NaCl}$ 수용액을 선정하여 상온( $25^\circ\text{C}$ )에서 360일 동안 침지실험하였다. 실험에 사용된 시험편은 부식생성물을 제거하고 다시 침지한 시험편(Removal corrosion product: RCP)과 계속 침지 시험편(Continuous immersed specimen: CIS)사이의 그 차이를 비교하고자 RCP와 CIS를 구분하였다.

부식전위는 부식용액 중에 변동된 전위를 안정화 시킨 후에 측정하였으며, 기준전극으로는 염화은 전극(Ag/AgCl electrode)을 시험편 작업전극(Work electrode)으로 하여 측정하였다. 또한 무게감소량은 침지 전에 미소전자저울(HR-200)로 중량을 측정하고 침지 후 15일 간격으로 시험평을 꺼내어 부식생

성물을 완전히 제거한 후 그 중량변화로서 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 시험편의 잔류응력

Fig. 3에 표면에 형성된 압축잔류응력을 X-선 잔류응력기(Rigaku - MSF2M)를 이용하여  $20\mu\text{m}$ 깊이 단위로 전해연마를 실행하면서 측정하여 나타내었는데, 최대  $-730\text{ MPa}$ 이 표면으로부터  $110\mu\text{m}$  깊이에 형성되었다.

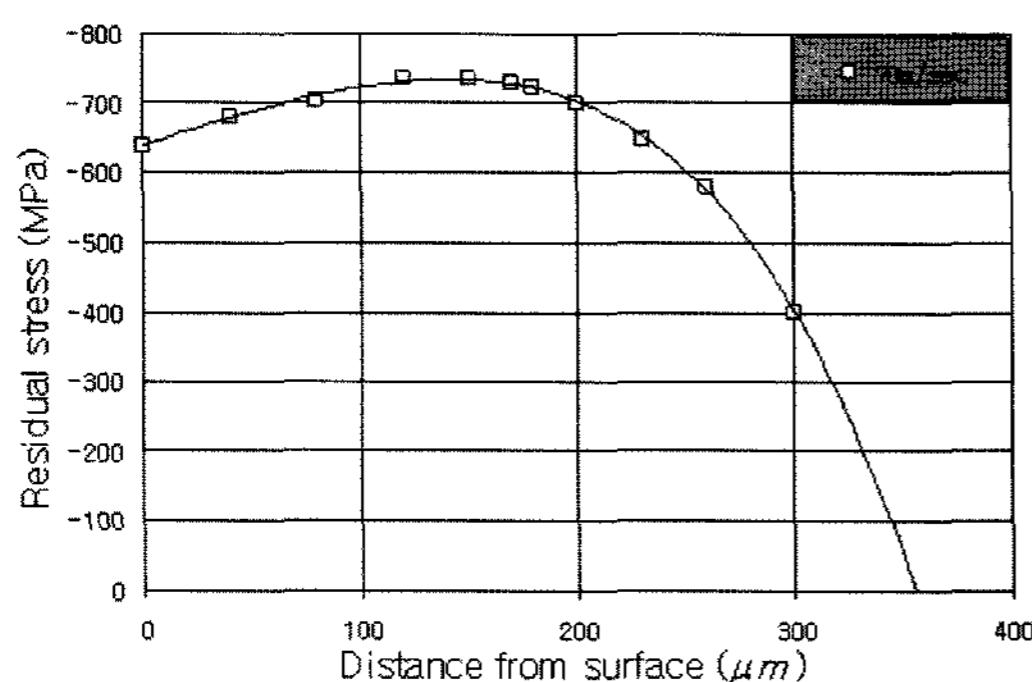


Fig. 3 Compressive residual stress distributions produced by shot-peening

#### 3.2 경도분포

Fig. 4는 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편의 경도분포를 나타낸 것이다.

경도측정은 로크웰 경도 측정기를 사용하여 시험편의 단면부를 채취하여 열경화성 수지에 고정하고

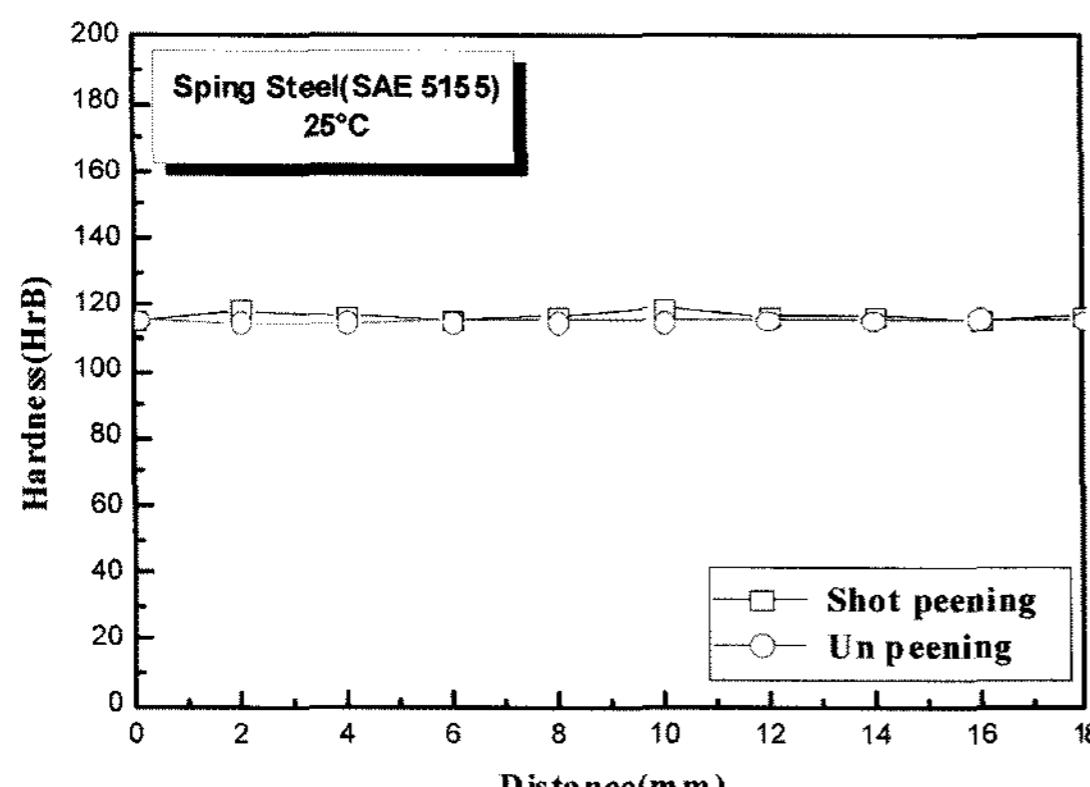


Fig. 4 Result of hardness test in ambient

폴리싱 작업을 한 후, 측정하중은 500g을 적용하여 압흔간격을 2mm로 하여 측정하였다.

압축잔류응력이 형성된 쇼트피닝 시험편의 경도는 평균 116.8(HrB)이고, 언피닝 시험편은 115.4(HrB)로서 전체적으로 경도의 변화는 없다고 판단된다. 이러한 결과는 스프링강이 강도 및 경도가 높은 재질이기 때문에 쇼트피NING 가공의 의해 표면 경도의 변화는 미비한 것으로 판단된다.

#### 3.3 부식전위의 변화

Fig. 5~7은 6%  $\text{FeCl}_3$  수용액, 3%  $\text{HF} + 10\%$   $\text{HNO}_3$  수용액, 3.5%  $\text{NaCl}$  수용액에 360일 동안 침지시켜 부식전위를 24시간주기로 측정하여 나타낸 것이다.

부식전위의 변화 양상에서 초기에는 세 가지 부식액에서 모두 쇼트피NING 시험편이 언피NING 시험편보다 약간 비한방향(-측 방향)으로의 전위가 형성되어 있는 것을 알 수가 있다. 이는 초기에 쇼트피NING 시험편이 쇼트피NING 가공시 쇼트볼 충돌로 인해 표면이 거칠어져 있어 부식진행의 가속화 요인으로 작용한 것으로 판단된다.<sup>5)</sup> 그러나 시간이 경과할수록 언피NING 시험편은 비한방향(-측 방향)으로 쇼트피NING 시험편은 귀한방향(+측 방향)으로 이동하는 양상을 보여주고 있다. 이러한 부식전위의 변화에서 귀한방향으로의 이행은 부식진행에 따른 산화피막의 형성으로 양분극의 증대로 인한 것이고, 비한방향으로의 이행은 이 피막이 떨어져 나감으로써 다시 부식이 활성화되어 나타난 것으로 판단된다. 즉 시간이

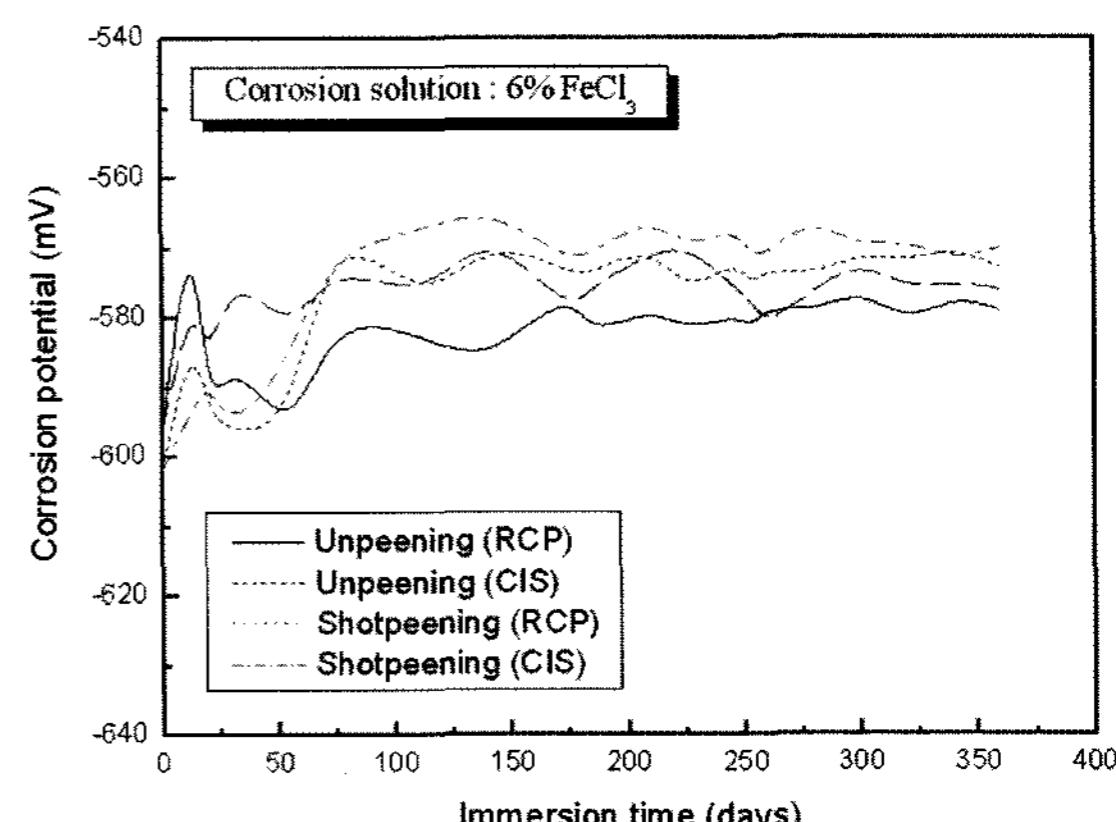


Fig. 5 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 6%  $\text{FeCl}_3$  solution

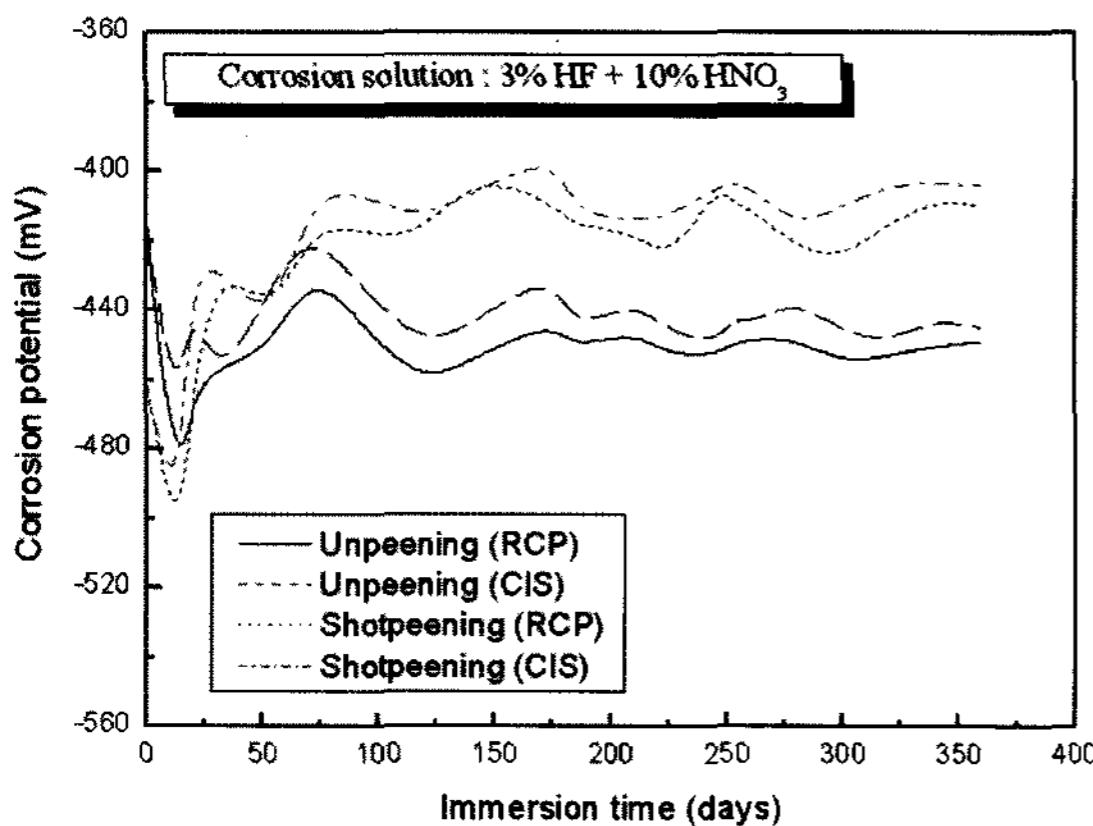


Fig. 6 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 10%  $\text{HNO}_3$ +3% HF solution

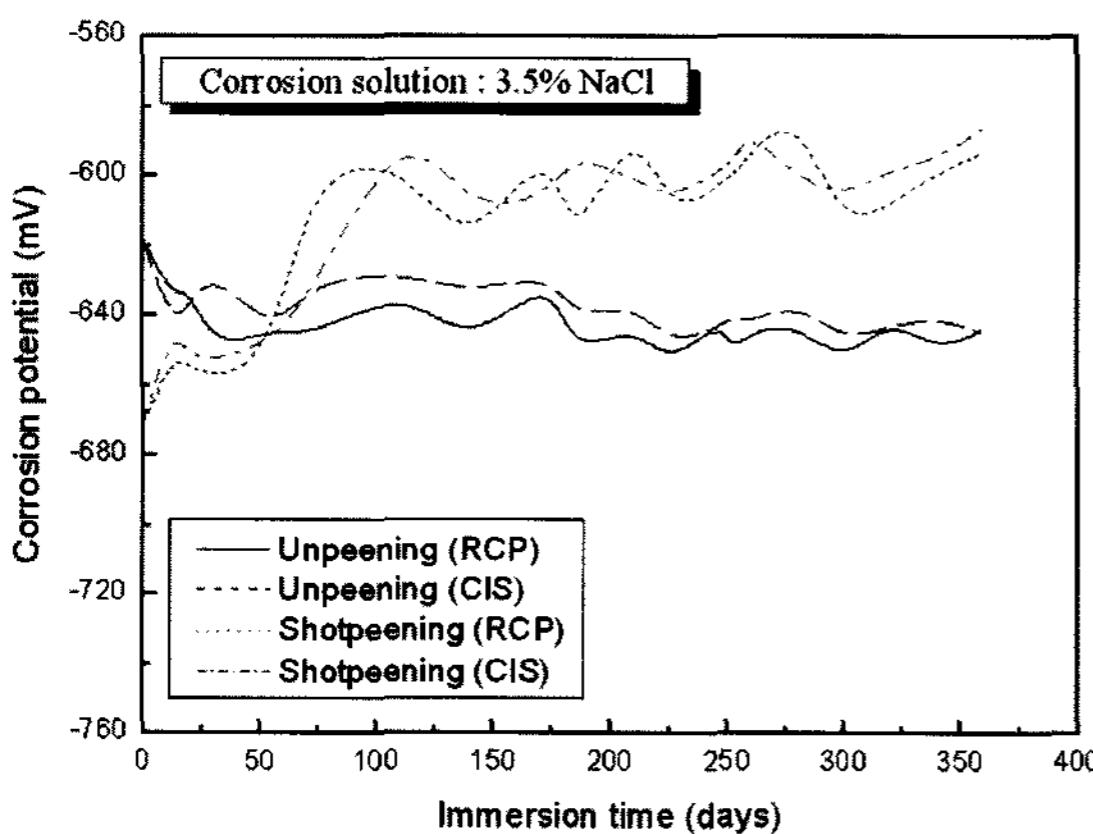


Fig. 7 Corrosion potential versus immersion time of specimens in 3.5% NaCl solution

경과할수록 쇼트피닝 시험편의 부식진행이 더디어지고 있음을 알 수가 있다. 이는 쇼트피닝 가공을 함으로써 모재의 보호층이나 부식피로균열에 대한 저항성을 높여 부식에 대한 민감도가 감소한 것으로 판단된다.

부식생성물을 제거하고 다시 침지한 시험편(RCP)과 계속 침지한 시험편(CIS)과의 비교에서는 다시 침지한 시험편의 전위가 계속 침지한 시험편의 전위보다 비슷한 방향으로의 전위가 형성되어 있음을 알 수가 있다. 이러한 결과는 부식진행에 따라 생성된 부동태 피막이 제거되어 외부의 부식환경에 대해 효과적으로 차단시키지 못함으로 인해 부식의 활성화가 약간 높은 것으로 생각된다.

공식(6%  $\text{FeCl}_3$ )에서의 부식전위의 양상을 보면

전위가 초기에는 증가하다가 점차 일정한 전위값을 형성하는 것을 알 수가 있다. 이 결과를 보면 시험편 표면에  $\text{Cl}^-$ 이온의 농도가 증가함에 따라 다음과 같은 식(1)의 반응에 의해 공식이 개시되는 것을 알 수가 있다. 따라서 공식이 개시된 이후에는 전위의 양상이 초기보다는 약간 증가하는 경향을 나타내었다.



입계부식(10%  $\text{HNO}_3$ +3% HF)에서의 부식전위의 양상은 초기에는 변동적인 부식전위의 값을 나타내고 있으나, 시간의 경과에 따라 언피닝 시험편은 일정한 값을 나타내고 있고, 쇼트피닝 시험편은 약간 증가하는 모습을 나타내고 있다. 따라서 세 가지 부식 용액 중에서의 입계 부식에서의 쇼트피닝의 효과가 크게 나타나고 있음을 판단할 수 있었다. 일반적으로는 부식 환경에서 금속결정의 입계부분에 가까이 있던 Cr원자가 탄소원자가 결합하여 탄화물을 만들어 입계에서 석출된다. 따라서 상대적으로 이 부분의 낮은 Cr농도와 내식성이 떨어져 재료의 파괴를 가져온다. 그러나 쇼트피닝 가공을 실시하면 입계에서의 탄화물 석출을 저지함으로써 상대적으로 언피닝 시험편에 비해 귀한 방향의 전위를 형성한 것으로 판단된다.

#### 3.4 부식액에 따른 무게감소량의 변화

Fig. 8~9는 6%  $\text{FeCl}_3$ 수용액에서 360일 동안 침지시켜 얻은 무게감소량을 나타낸 그래프이다.

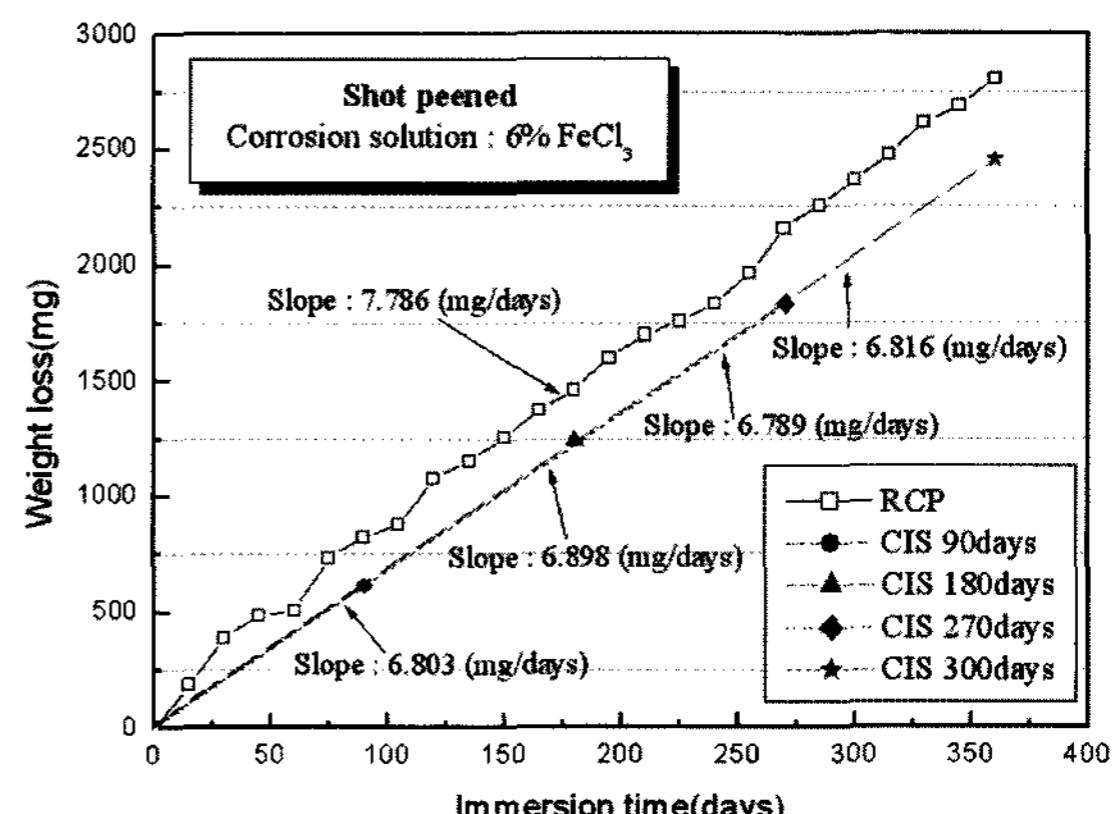


Fig. 8 Weigh loss versus immersion time of shot peened specimens in 6%  $\text{FeCl}_3$

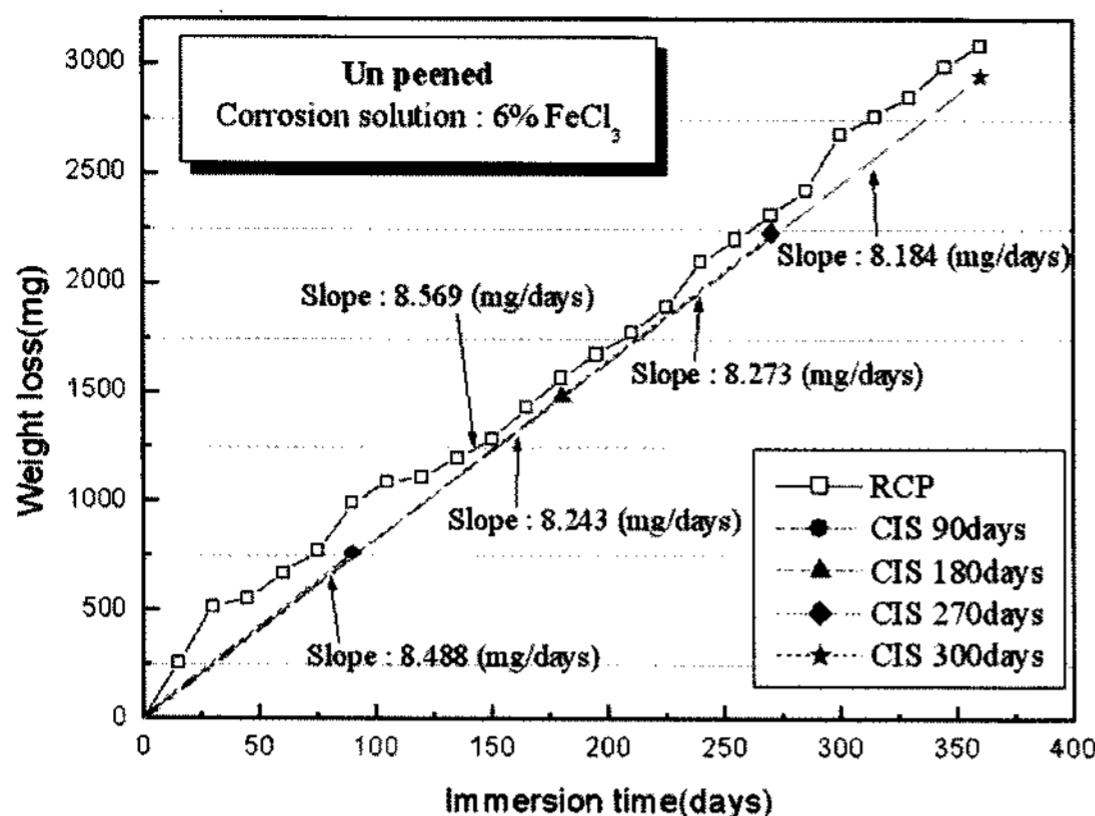


Fig. 9 Weigh loss versus immersion time of Un peened specimens in 6%  $\text{FeCl}_3$

6%  $\text{FeCl}_3$ 에서 언피닝재와 쇼트피닝재의 무게감소량은 RCP시험편에서 언피닝재가 0.783 (mg/day), CIS시험편에서 1.3~1.6 (mg/day) 많은 감소량을 보였다. 실험에 사용된 3가지 용액 중  $\text{FeCl}_3$  용액실험에서 가장 큰 무게감소량을 보였는데 이는  $\text{FeCl}_3$ 가 산을 생성할 뿐만 아니라 앞서 언급했던 리닥스쌍 ( $\text{Fe}^{3+} + \text{e}^- \rightarrow \text{Fe}^{2+}$ )을 생성하여 산화력을 추가적으로 제공함으로써 부식을 가속화시키고 있기 때문이다.

Fig. 10~11은 3% HF + 10%  $\text{HNO}_3$ 수용액에서 360일 동안 침지시켜 무게감소량 측정한 그래프이다. 3% HF + 10%  $\text{HNO}_3$ 수용액은 3.5% NaCl수용액보다 산화성 산(oxidizing acid)으로 큰 부식성을 가지고 있음에도 불구하고 초반 쇼트피닝과 언피닝재의 무게감소량은 적었지만 180일 이후부터는 3.5% NaCl 수용액의 무게감소량이 감소되지만 3% HF + 10%  $\text{HNO}_3$ 수용액은 상승세를 보였다. 또한 Fig. 10~11에서 RCP시험편의 경우 언피닝재가 쇼트피닝재보다 약 0.717(mg/day), CIS시험편의 경우 기간별로 0.5~0.7(mg/day)의 많은 무게 감소량을 나타났으며 무게감소비율에 있어서 점차 감소한 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급한 잔류응력증과 성장응력과의 상호작용으로 인한 부동태 피막의 파괴로 인한 것으로 판단된다.

Fig. 12~13은 3.5% NaCl수용액에서 360일 동안 침지시켜 얻은 무게감소량을 나타내고 있는 그래프이다. 대체로 RCP 시편은 쇼트피닝재와 언피닝재의 차이는 언피닝재가 약 0.12 (mg/day)의 많은 감소량을 보였다. CIS 시편 역시 90일(+ 0.636), 180일

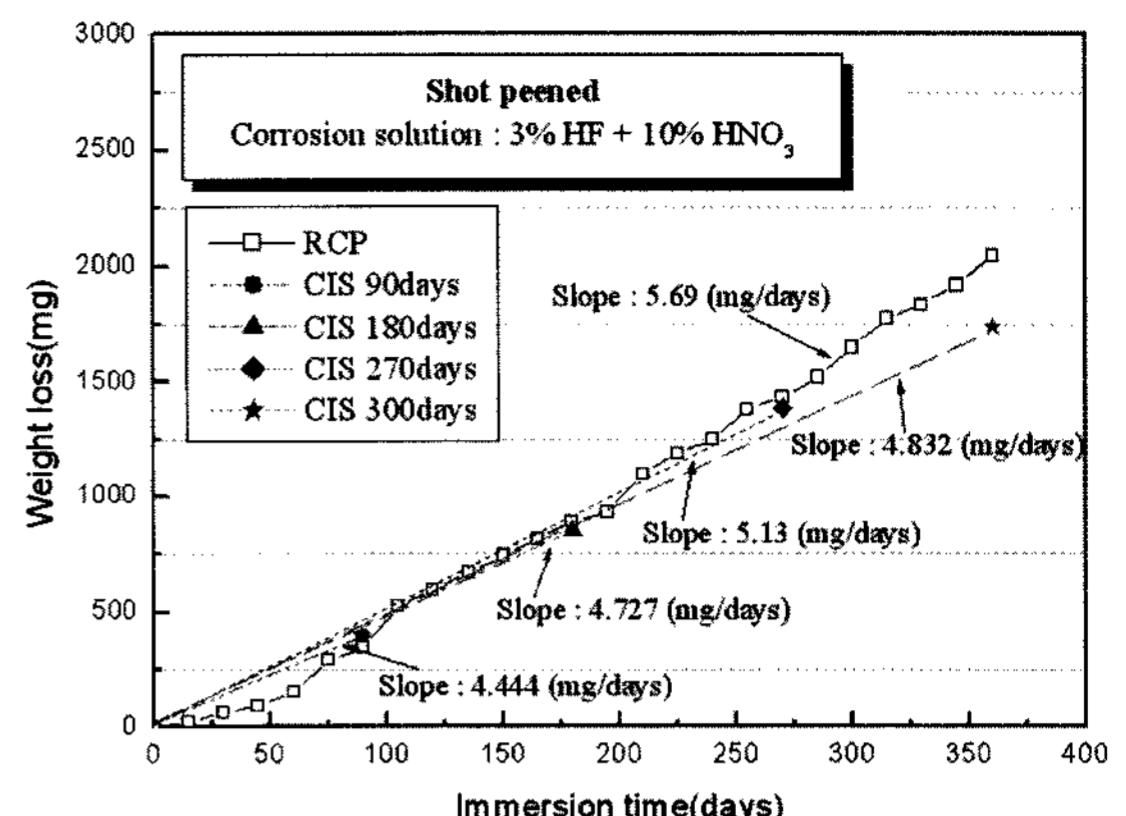


Fig. 10 Weigh loss versus immersion time of shot peened specimens in 3% HF + 10%  $\text{HNO}_3$

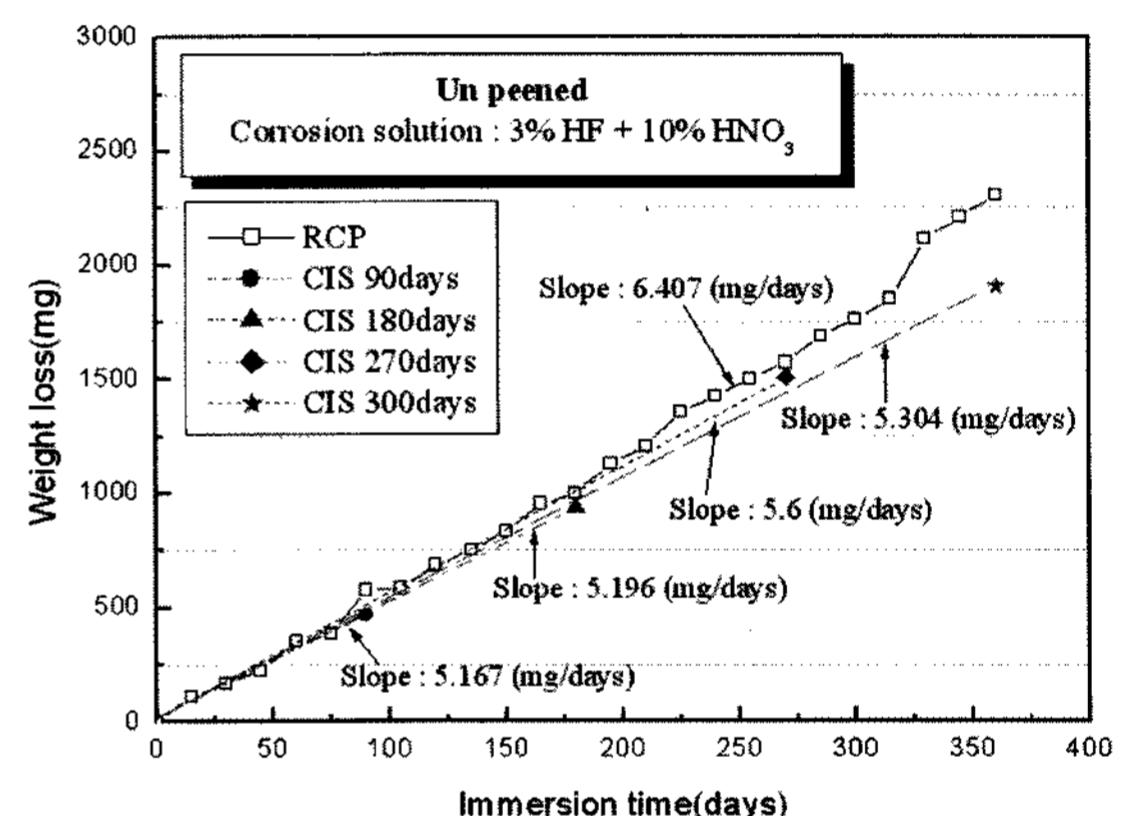


Fig. 11 Weigh loss versus immersion time of Un peened specimens in 3% HF + 10%  $\text{HNO}_3$

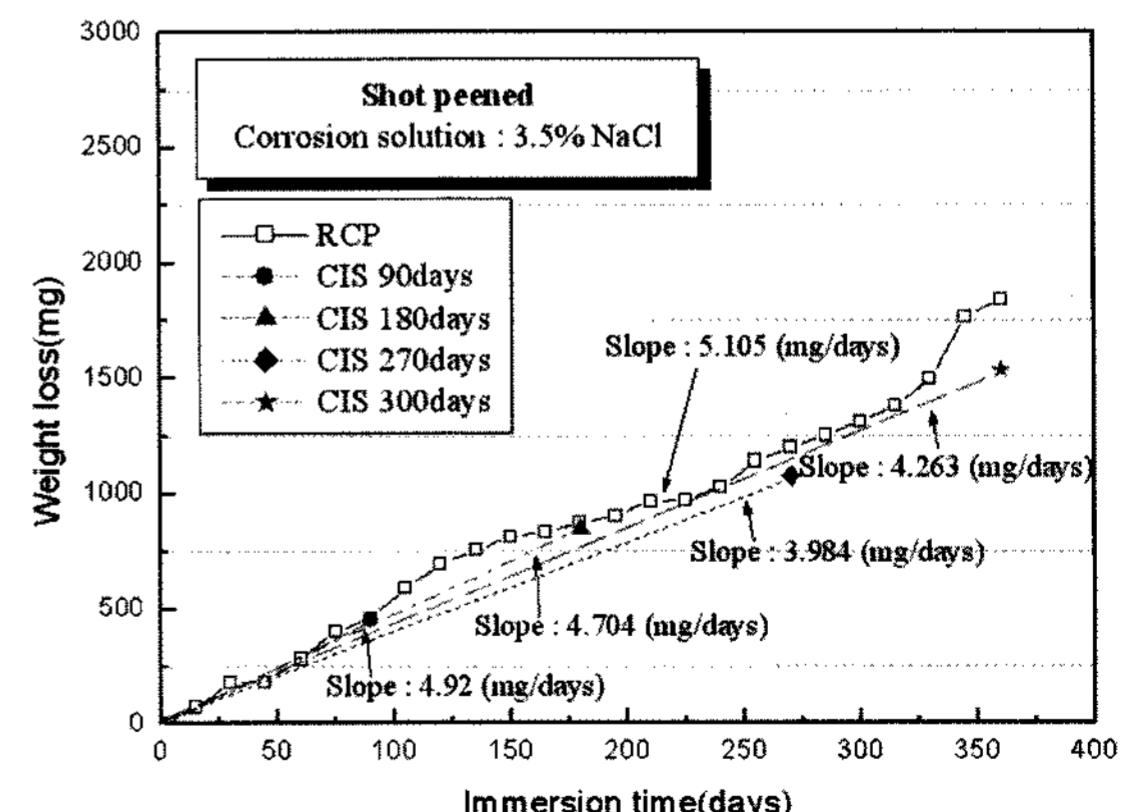


Fig. 12 Weigh loss versus immersion time of shot peened specimens in 3.5% NaCl

(+0.871), 270일(+0.201), 360일(+0.356)의 언피닝재가 많은 무게감소량을 보였다. 그리고 시간이 경과

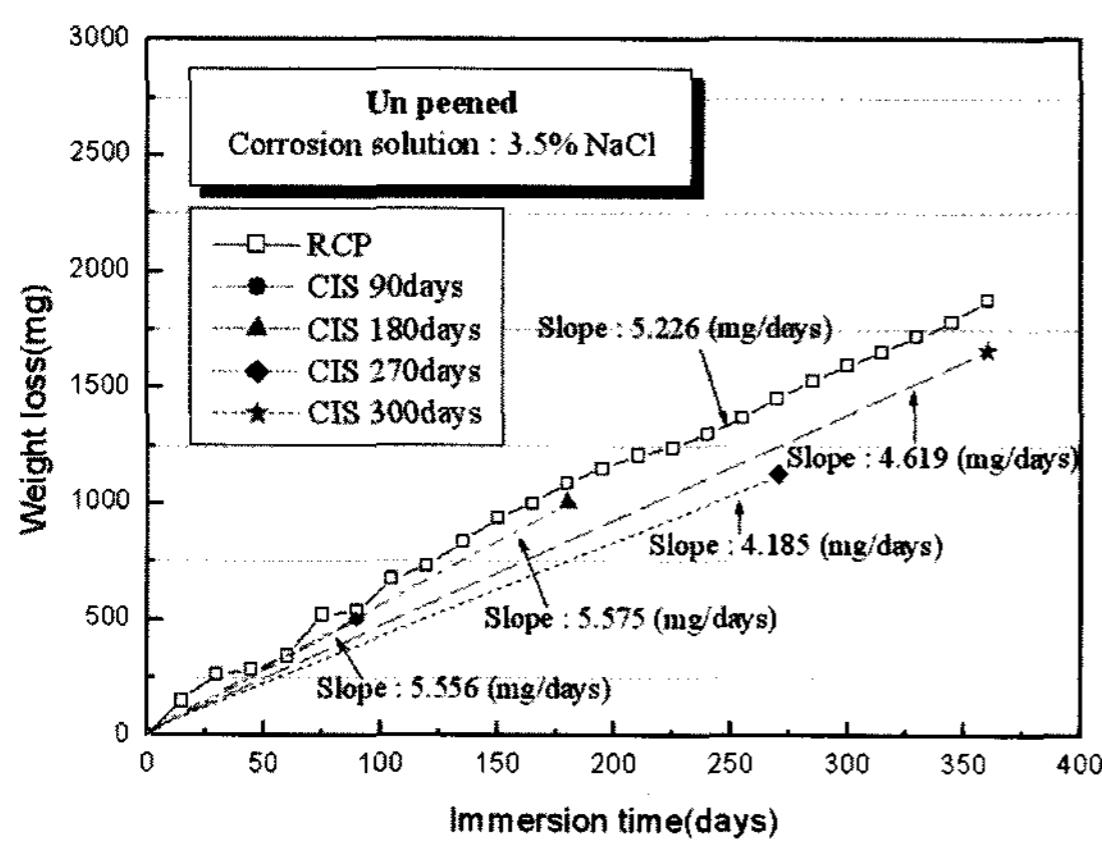


Fig. 13 Weigh loss versus immersion time of Un peened specimens in 3.5% NaCl

할수록 쇼트피닝과 언피닝의 감소량의 차이가 줄어드는 이유는 쇼트피닝재의 표면에 생성된 기공과 미소균열에 염소이온의 농축으로 인해 쇼트피닝 층의 용해가 서서히 시작되었기 때문으로 판단된다.<sup>6)</sup>

Table 4 Weight loss ratio of specimens by corrosion

Weight loss ratio		6% FeCl <sub>3</sub>	3% HF + 10% HNO <sub>3</sub>	3.5% NaCl
<b>R</b> <b>C</b> <b>P</b>	Shot peening [mg/days]	7.786	5.69	5.105
	Un peening [mg/days]	8.569	6.407	5.226
<b>C</b> <b>I</b> <b>S</b>	Shot peening [mg/days]	90    6.803 180    6.898 270    6.789 300    6.816	4.444    4.727 5.13    4.704 4.832    4.263	4.92 3.984 5.556 4.185
	Un peening [mg/days]	90    8.488 180    8.243 270    8.273 300    8.184	5.167    5.196 5.6    5.575 5.304    4.619	5.556 4.185 4.619

### 3.5 부식 환경에 따른 표면조도의 변화

Fig. 14는 상온에서의 쇼트피닝 시험편과 언피닝 시험편의 표면조도를 측정하여 비교한 것이다. 표면조도 측정은 0.25mm구간을 굴곡의 중심선 산술평균값(Ra)과 굴곡의 최대값(Ry)으로 나타내었다.

상온에서 쇼트피닝 시험편은 Ra가 1.50μm Ry가 6.95μm로 측정되었고, 언피닝 시험편은 Ra가 0.22μm

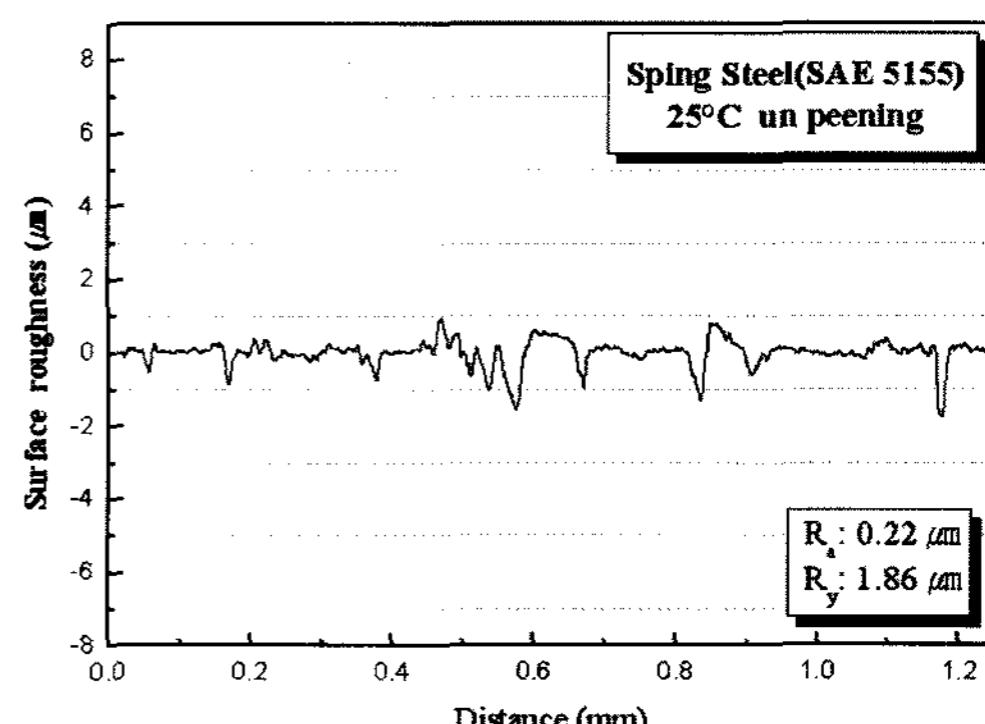
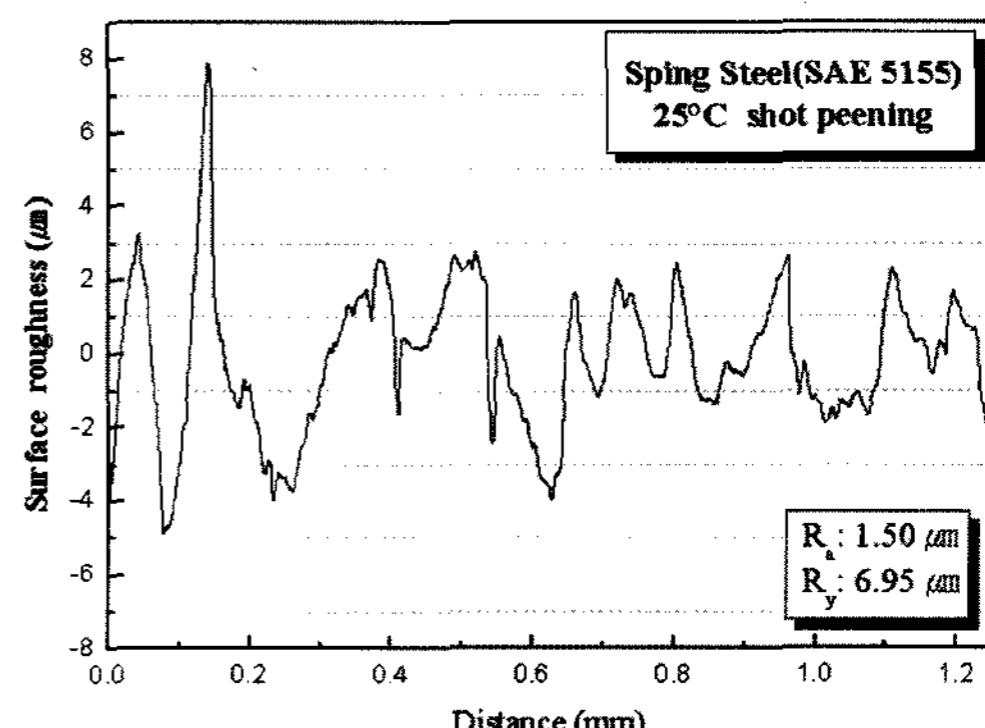
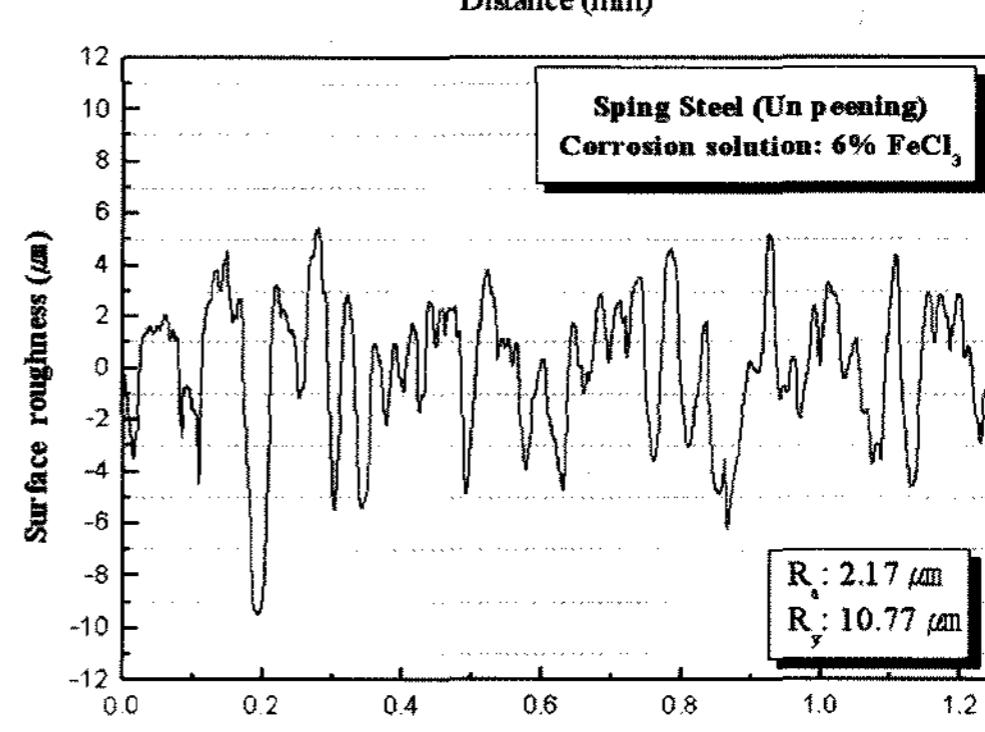
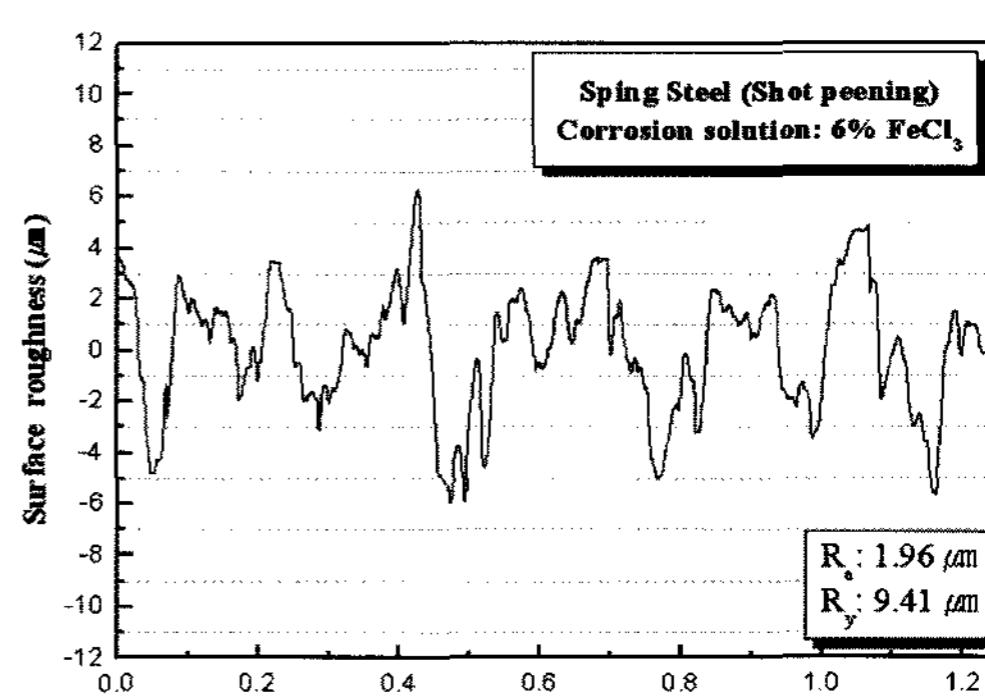


Fig. 14 Profile of surface roughness pattern in ambient



(a) 6% FeCl<sub>3</sub> solution

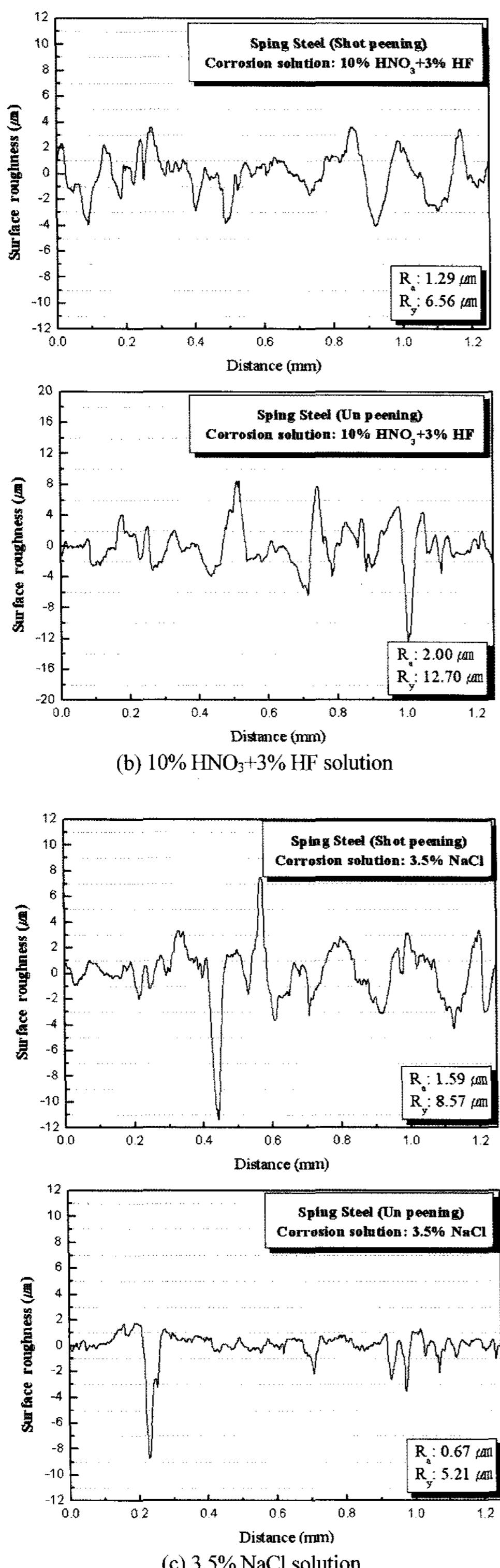


Fig. 15 Profile of surface roughness pattern after immersion test during 270days

Ry가 1.86μm로 쇼트피닝 시험편이 더 높은 값을 나타내었다. 이는 쇼트피닝 가공 시 쇼트볼 충돌로 인해 표면이 거칠어져 이와 같은 값을 나타낸 것으로 판단된다.

Fig. 15는 각 부식조건에서 360일 침지 후 시험편의 표면조도를 측정하여 나타낸 것이다. 10% HNO<sub>3</sub> + 3% HF수용액의 경우 언피닝 시험편은 약 1.27배 (1.57μm→2.00μm), 쇼트피닝 시험편은 약 0.76배(1.68 μm→1.29μm)로 쇼트피NING 시험편의 경우 침지기간이 길어질수록 표면조도 값이 감소하는 경향을 나타내었다.

#### 4. 결 론

각각의 부식액에서 쇼트피닝의 효과를 알아보기 위해 360일 동안 침지시켜 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 쇼트피NING 시험편의 표면에서의 경도는 평균 116.8(HrB)이고, 언피NING 시험편은 115.4(HrB)로서 전체적으로 경도의 변화는 없다고 판단된다.
- 2) 부식전위의 변화에 있어서 세 가지 부식액 모두 쇼트피NING재가 언피NING재보다 안정화된 전위를 보여주며 부식에 대한 저항이 언피NING재 보다 쇼트피NING재가 크다고 볼 수 있다. 또한 RCP시험편과 CIS시험편의 비교에 있어서 RCP시험편이 비방향(-측 방향)의 전위를 형성하였다. 이는 부식 생성물 제거로 인해 부동태 피막이 파괴되어져 부식환경에 대해 효과적으로 차단하지 못하였기 때문으로 판단된다.
- 3) 무게감소량에 있어서 쇼트피NING재가 언피NING재에 비해 용액에 따라 0.1~0.8(mg/days)정도의 적은 무게감소를 보이며 쇼트피NING의 잔류응력으로 인한 내식성이 증가한 것으로 해석된다. 또한 6% FeCl<sub>3</sub>가 가장 많은 감소량을 나타났으며  $Fe^{3+} + e^- \rightarrow Fe^{2+}$ 의 환원 반응으로 극의 산화 속도를 가속화시킴으로써 부식속도가 증가된 것으로 판단된다. 그리고 세 가지 부식액 모두 시간이 갈수록 쇼트피NING재와 언피NING재의 무게감소비율이 작아지는 것으로 봐서 부식이 진전됨에 따라 쇼트피NING의 잔류응력효과의 감소로 인한 것으로 판단된다.
- 4) 상온에서 쇼트피NING 시험편의 표면조도는 Ra가

$1.50\mu\text{m}$  Ry가  $6.95\mu\text{m}$ 로 측정되었고, 언피닝 시험편은 Ra가  $0.22\mu\text{m}$  Ry가  $1.86\mu\text{m}$ 로 나타났다. 그리고 각 부식조건에서 360일 침지 후 시험편의 표면조도를 측정한 결과  $10\% \text{ HNO}_3 + 3\% \text{ HF}$ 수용액의 경우 언피닝 시험편은 약 1.27배( $1.57\mu\text{m} \rightarrow 2.00\mu\text{m}$ ), 쇼트피닝 시험편은 약 0.76배( $1.68\mu\text{m} \rightarrow 1.29\mu\text{m}$ )로 쇼트피닝 시험편의 경우 침지기간이 길어질수록 표면조도 값이 감소하는 경향을 나타내었다.

### References

- 1) K. D. Park and C. K. Jung, "The Effect of Compressive Residual Stresses on Fatigue Strength in DIN50CrV4-SAE9254 Steel," The Korea Committee for Ocean Resources and Engineering, Vol.15, No.3, pp.94-100, 2001.
- 2) W. F. Brown and J. E. Strawley, "Plane Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials," ASTM STP 410, pp.92-98. 1966.
- 3) S. K. Cheong, S. H. Lee and S. C. Chung, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," Transactions of KSME(A), Vol.25, No.10, pp.1590-1596, 2001.
- 4) S. G. Jung and S. H. Lee, A Guide of Shot peening Proceeding, SeHwa Publication, pp.6-29, 2001.
- 5) K. D. Park and K. J. Ha, "Influence of Shot Peening on the Corrosion of Spring Steel," The Korean Society of Ocean Engineers, Vol.17, No.3, pp.39-45. 2003.
- 6) F. W. Gibson, "Corrosion, Concrete, and Chloride," The Australasian Conference on Information Security and Privacy 102, p.13, 107, 155, 161, 1987.