

## 3.5% NaCl 수용액에서 SAE 5155의 부식거동에 미치는 쇼트피닝의 영향

박경동† · 안재필\*

(원고접수일 : 2005년 5월 13일, 심사완료일 : 2005년 9월 5일)

### The Effect of Shot Peening on Corrosive Behavior of SAE 5155 in 3.5% NaCl Solution

Keyung-Dong Park† · Jae-Pil An\*

**Abstract :** In this study, investigated the effect of shot peening on the corrosion of SAE 5155 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 etc. were investigated from experimental results. From these 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 SAE 5155 on the corrosion are as follows: Shot peened specimens show the low of corrosion current as compared with un peened specimens. In the case of corrosion potential, shot peened specimen shows more negative potential as compared with that of parent metal. Surface of specimen, which is treated with shot peening process, is placed as more activated state against inner parent metal. Corrosion rate is shown that shot peened specimens have less corrode than un peened specimens. But non heat treated shot peened specimens show the biggest weight loss owing to variable compressive residual stress layer by shot ball.

**Key words :** Shot-peening(쇼트피닝), Corrosion(부식), Corrosion potential(부식전위), Corrosion current(부식전류), Corrosion rate(부식속도)

#### 1. 서 론

최근 산업기술의 고도화에 의해 금속의 고강도화가 요구되어 지고 있고, 가혹한 부식 환경조건 등에서의 사용빈도가 점차 증가되어가고 있는 추

세이다<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

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

\* 부경대학교 기계공학부 대학원

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 고부가가치인 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 쇼트피닝을 실시한 후 정적부식 환경에서 부식거동과 압축잔류응력과의 관계를 통해 부식방지 기술을 개발하고자 하였다. 이를 위해 초기단계로서 쇼트피닝을 실시한 SAE 5155가 부식 환경에서 어떠한 부식특성을 나타내는지 조사하였다. 또한 쇼트피닝 가공절차에 있어서 열처리 유무가 부식에 미치는 영향에 관해서도 조사하였다. 이러한 연구결과로 인해 부식에 의해 발생하는 경제적 손실을 줄이고 자동차 재료의 최적설계를 위한 데이터베이스를 구축하고자 하였다. 또한 이 연구는 경량화 설계 및 청정(Green) 환경실현에도 기여할 것으로 기대한다.

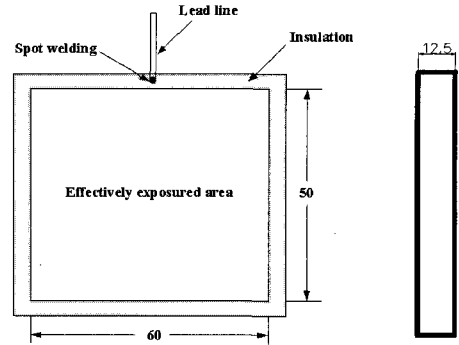
## 2. 실험방법

### 2.1 재료 및 시험편

실험재료는 자동차 및 철도의 현가장치에 주로 사용되고 있는 SAE 5155으로서, 그 화학적 성분을 Table 1에 표시하였다. 침지실험에 사용된 시험편의 형상은 Fig. 1과 같이 50×60×12.5mm의 평판으로 하였고, 시험편의 기계적 성질을 Table 2에 나타내었다. 시험편의 기계적 성질은 열처리(quenching and tempering) 전후의 결과로서, 열처리는 970℃에서

**Table 1 Chemical compositions of SAE 5155 [wt%]**

Material	C	Si	Mn	P	S	Cr	V
SAE 5155	0.56	0.25	0.84	0.016	0.009	0.88	-



**Fig. 1 Shape and dimensions of specimen**

**Table 2 Mechanical properties of SAE 5155 after heat treatment**

Materials	Tensile strength (MPa)	Hardness (HrC)		Elongation ratio (%)
		After quenching	After tempering	
SAE 5155 (Non-HT)	980	40 (Non-HT)		9
SAE 5155 (HT)	1350	57	44	9.4

※ HT : Heat-Treatment

20분간 가열한 후 유증에서 담금질을 실시한 다음 다시 490℃에서 80분간 유지하는 템퍼링을 하였다. 기계적 성질을 시험하기 위한 인장시험편은 KSB-08의 규격4로 가공하였다. 경도는 표면으로부터 100μm 깊이의 로크웰 경도값(Ball diameter. : 10 mm, 하중: 3000 kg)이다. 시험편의 종류는 열처리 유무와 쇼트피닝 유무에 따라서 열처리 전 언피닝(NonHT & unpeened), 열처리 후 언피닝(HT & unpeened), 열처리 전 쇼트피닝(NonHT & shot-peened), 열처리 후 쇼트피닝(HT & shot-peened) 시험편으로 총 4가지 종류로 하였으며, 부식실험 시 시험편 종류별로 각각 세 개씩 시험하였다.

### 2.2 쇼트피닝

쇼트피닝 가공은 판스프링 제조용 쇼트피닝기를 이용하여 SAE 5155에 1단 쇼트피닝(1 stage shot peening)을 실시하였다. 쇼트피닝은

Table 3과 같은 조건하에서 실시하였으며, 시험편 표면전체에 균일한 쇼트피닝 가공면이 형성되도록 양면에 쇼트피닝 가공을 실시하였다.

2.3 실험장치 및 방법

침지실험에는 탈기처리하지 않은 3.5% NaCl 수용액(pH 8)을 채운 2ℓ용량의 부식환경조에 시험편을 침지시키고, 시험편은 고정시켜 각 시험편이 겹치지 않도록 하였다.

부식액의 교체는 7일 간격으로 교체하였으며, 시험기간은 7일, 14일, 30일, 60일 4가지로 하였다. 무게감소량은 침지시험완료 후 중량변화로서 측정하였다. 시험편은 침지시험 전에 표면을 #100~2000까지의 에머리페이퍼로 경면연마 실시한 후 아세톤으로 탈지시켰다. 또한 유효노출면적 50×60mm를 제외한 나머지 부분을 실리콘 수지로 피복 절연시켜 부식의 영향을 받지 않도록 하였다. 침지시험 기간동안 표면의 요철상태를 조사하기 위해 표면조도계(KOSAKA, surfacorder SEF-30D)를 이용하였다. 측정 침의 선단반경은 2μm를 선택하여 측정하중은 1g으로 하고 종배율은 1000배, 횡배율은 50배로 하여 형상파일을 체크 하였다.

Table 3 Conditions of shot peened

Condition	1 stage shot peening
Impeller diameter	490 mm
Blades width / Q`ty	90 mm / 6 pcs
rpm	2200 rpm
Shot ball diameter	0.8 mm
Time	24 sec
Arc height (Alman A-stip)	0.375 mm
Coverage	85 %

중량감량의 측정을 위한 침지실험 후 재료의 부식속도를 평가하기 위한 전기화학적 방법으로서, 분극측정기(EG&G273A Potentiostat

/Galvanostat)와 PC를 이용하여 부식소프트웨어(corrosion software)에 의해 분극측정을 하였다. 분극측정에 사용된 기준전극(reference electrode)으로는 포화칼로멜 전극(saturated calomel electrode, SCE)을, 상대전극(counter electrode)으로는 2개의 고밀도 탄소봉을 사용하였고, 주사속도(Scan rate)는 0.167 mV/sec로 하였다. 부식 환경 조건은 3.5% NaCl 수용액에서 유효노출면적을 10×10mm로 하여 표면을 경면연마를 시킨 후 아세톤으로 탈지하여 Fig.2의 분극시험장치에 배선하였고, 시험편을 부식용액에서 10분 정도 변동전위를 안정화시킨 후에 분극실험을 실시하였다.

부식액에 침지전후의 압축잔류응력의 변화를 알아보기 위해 X-선 잔류응력측정기(RIGAKN-MASF2M)를 이용하여 시험편 표면의 압축잔류응력의 분포를 알아보았다. 깊이 방향의 잔류응력 측정을 위해 전해연마기로 시험편의 측정부위를 10~20μm 단위로 연마해 가면서 측정하였다<sup>[4], [5]</sup>.

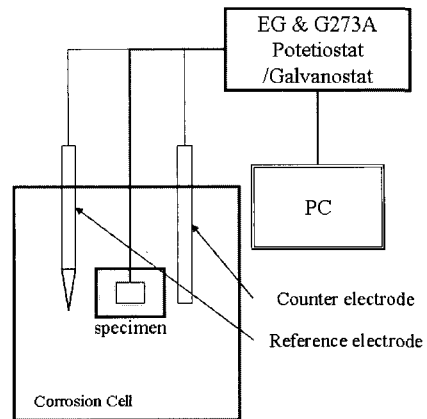
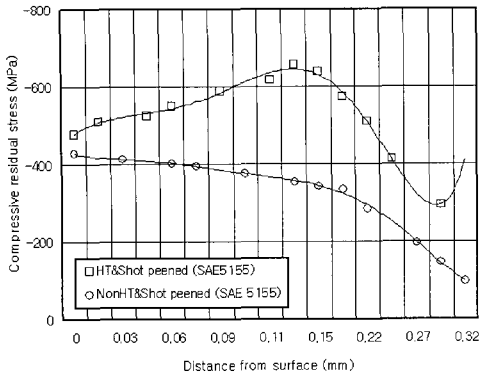


Fig. 2 Schematic diagram of polarization test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 부식에 따른 압축잔류응력의 변화

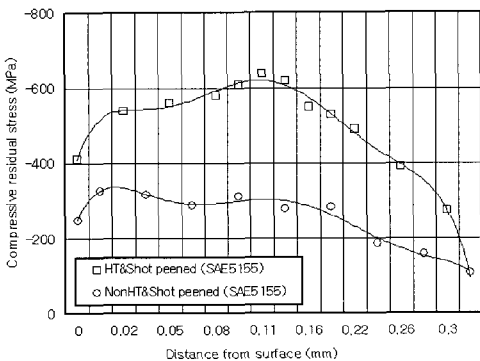
쇼트피닝 가공한 SAE5155 시험편의 부식시험 전 열처리 유무에 따른 압축잔류응력의 분포를 Fig. 3에 나타내었다.



**Fig. 3 Compressive residual stress distributions of shot peened SAE 5155 steel before immersion test**

Non HT & shot peened 시험편의 경우 최대 압축잔류응력이 시험편 표면에 427.42MPa를 나타내었고, HT & shot peened 시험편의 경우 표면으로부터 내측 0.13mm에 657.05MPa의 최대 압축 잔류응력을 나타내었다. HT & shot peened 시험편이 Non HT & shot peened 시험편보다 대략 229.48MPa 정도 높게 나타났다. 이는 열처리로 인해 표면부의 조직이 연화되어져 쇼트볼의 충돌 시 더 큰 압축잔류응력을 형성한 것으로 판단된다.

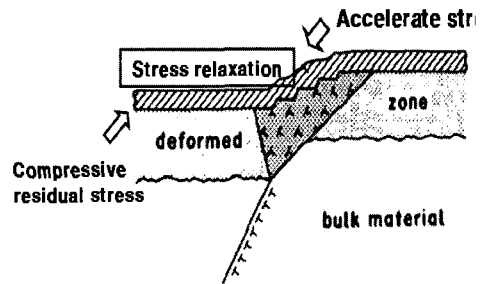
부식실험 후 두 시험편의 압축잔류응력의 분포를 Fig. 4에 나타내었다. HT & shot peened 시험편은 표면으로부터 내측 0.012mm에 최대 압축 잔류응력 320MPa를 나타내었고, Non HT & shot peened 시험편은 표면으로부터 내측 0.115mm에 630MPa의 최대 압축잔류응력을 나타내었다.



**Fig. 4 Compressive residual stress distributions of shot peened SAE5155 steel after immersion test during 60 days**

두 시험편 모두 부식시험 후에 압축잔류응력이 감소되었으며 이는 Fig. 5에 나타난 것처럼 보호 피막의 생성과 성장으로 발생하는 성장응력과 기존에 쇼트피닝 가공으로 생성된 압축잔류응력과의 상호작용에 의해 응력감소가 일어난 것으로 판단된다. 즉 부식 환경에서는 부식이 진행됨에 따라 보호피막이 생성 및 성장하여 보호피막이 탈락하게 된다. 이 보호피막을 탈락하게 하는 힘이 성장 응력으로서, 성장응력이 (+)축 응력이라면 압축 잔류응력은 (-)축 응력으로서 응력이완에 의해 보호 피막의 형성시간이 길어져 외부 부식 환경에 대한 모재의 보호기능이 우월해진 것으로 판단된다.

특히 Non HT & shot peened 시험편의 경우는 압축잔류응력이 많이 감소되었다. 이는 열처리 없이 쇼트피닝을 실시함으로써 쇼트볼에 의한 압축층이 연속적이지 못하고 요철이 다소 거칠게 형성되었기 때문에 부식에 의한 잔류응력의 감소가 크게 나타난 것으로 판단된다. 즉 압축잔류응력층의 불균일한 형성은 응력이 많이 걸린 부분이 양극으로 작용하여 국부전지에 의한 부식진행이 활성화 되는 요인으로 작용하기 때문이다.



**Fig. 5 Schematic diagram of stress decrease by corrosion**

3.2 무게감소량 및 부식속도

네 가지 종류의 시험편을 7일, 14일, 30일, 60일 기간동안 침지시켜 얻어진 무게감소량과 부식속도를 Fig. 6~Fig. 9에 나타내었다. 무게감소량은 침지시험 전에 중량을 측정하고 시험 후 부식생성물을 완전히 제거한 후에 측정하였다. 부식속도는 mils penetration per year(mpy) 단위

를 사용하였으며, 중량감량을 부식속도로 환산하는 식(1)은 다음과 같다<sup>[6]</sup>.

$$mpy = \frac{(12,000 \times 287 \times w)}{(A \times d \times t)} \quad (1)$$

- w : 중량감량(gf)
- A : 시험편의 표면적(cm<sup>2</sup>)
- d : 시험편의 비중량(gf/cm<sup>3</sup>), SAE 5155=7.83gf/cm<sup>3</sup>
- t : 침지시간(hours)

실험결과를 보면 Non HT & shot peened 시험편이 가장 높은 무게감소량과 부식속도를 나타내었고, HT & shot peened 시험편이 가장 낮은 무게감소량과 부식속도를 나타내었다. 이는 열처리 없이 쇼트피닝 가공 시 쇼트볼에 의한 압축층이 연속적이지 못하고 뒤에 언급하겠지만, 표면요철이 다소 거칠게 형성되어 부식진행이 활성화

되는 요인으로 작용했기 때문이라고 생각된다.

언피닝 시험편의 경우 초기에는 HT & unpeened 시험편이 Non HT & unpeened 시험편 보다 낮은 수치를 나타내었다. 이는 열처리에 의해 조직이 균일하고, Cr의 고용량이 크므로 Fe-Cr탄화물의 상이 나타남에 따라 내식성이 향상되어진 것으로 판단된다<sup>[7]</sup>. 반면 HT & shot peened 시험편이 시간이 경과함에 따라 무게감소량과 부식속도가 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 쇼트피닝 가공에 의해 생성된 압축잔류응력층이 용해되어져 내부로 갈수록 부식에 대해 민감해졌기 때문으로 판단된다.

### 3.3 부식에 따른 표면조도

네 가지 종류 시험편의 부식기간에 따른 표면조도의 경향을 Fig. 10~Fig. 11에 나타내었다. 먼

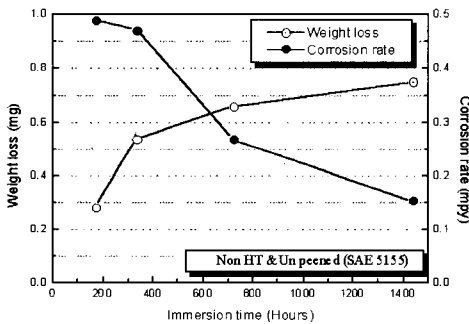


Fig. 6 Weight loss, corrosion rate versus immersion time of Non HT & unpeened as immersed in 3.5% NaCl

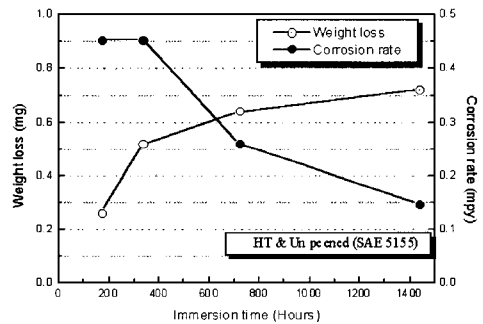


Fig. 7 Weight loss, corrosion rate versus immersion time of HT & unpeened as immersed in 3.5% NaCl

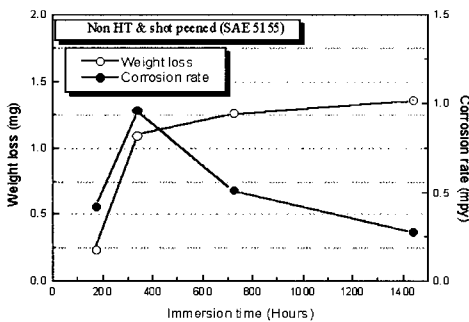


Fig. 8 Weight loss, corrosion rate versus immersion time of Non HT & shot peened as immersed in 3.5% NaCl

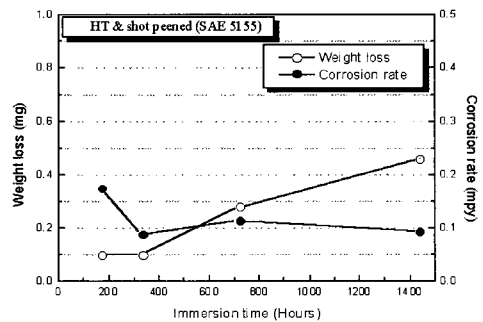


Fig. 9 Weight loss, corrosion rate versus immersion time of HT & shot peened as immersed in 3.5% NaCl

저 평균조도(Ra)에 변화에 있어서 Non HT & un peened 시험편과 HT & un peened 시험편은 각각 30일 후 약 1.85배(0.39 $\mu\text{m}$ →0.72 $\mu\text{m}$ ), 약 1.74배(0.23 $\mu\text{m}$ →0.40 $\mu\text{m}$ ) 정도로 표면이 거칠어졌다. 반면에 Non HT & shot peened 시험편과 HT & shot peened 시험편은 각각 60일 후 약 1.3배(4.82 $\mu\text{m}$ →6.27 $\mu\text{m}$ ), 약 1.01배(3.80 $\mu\text{m}$ →3.83 $\mu\text{m}$ ) 정도로 표면이 거칠어졌다. 따라서 시간 경과에 따른 조도변화는 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편에 비해 부식기간이 2배 이상 경과하였음에도 불구하고, 표면조도의 변화가 크게 나타나지 않았다. 최대표면조도(R<sub>max</sub>)에 있어서는 쇼트피닝 시험편의 경우 Non HT & shot peened 시험편은 60일 후 약 10 $\mu\text{m}$  정도 증가하였고, HT & shot peened 시험편은 약 1 $\mu\text{m}$  정도 감소하는

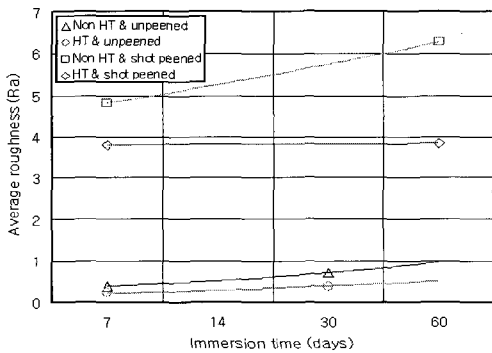


Fig. 10 Average surface roughness of shot peened and un peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

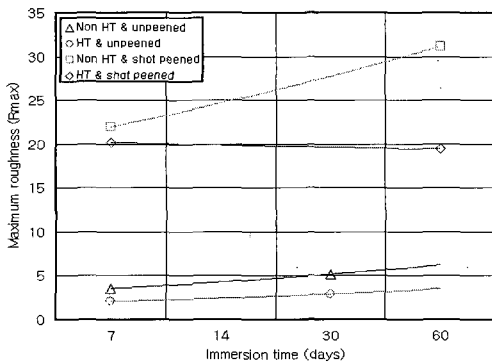


Fig. 11 Maximum surface roughness of shot peened and un peened specimens as immersed in 3.5% NaCl

경향을 나타내었다. 이는 열처리 없이 쇼트피닝 가공할 경우 쇼트볼 충돌에 의해 표면의 거칠기가 증가하였고, 부분적으로 거친면이 양극이 되어 부식이 활성화 된 것으로 판단된다. 즉 거친 표면에 Cl<sup>-</sup>이온의 침투로 국부부식이 가속화되어 금속표면이 더 거칠어진 것으로 판단된다.

3.4 분극거동의 양상

각각의 시험편에 분극측정을 실시하여 얻은 분극곡선을 Fig. 12에 나타내었다. 각각의 시험편 부식전위(E<sub>corr</sub>)와 부식전류밀도(i<sub>corr</sub>)는 부식소프트웨어에 의해 Tafel외삽법<sup>(8)</sup>으로 구하였으며, 그 값을 Table 4에 나타내었다.

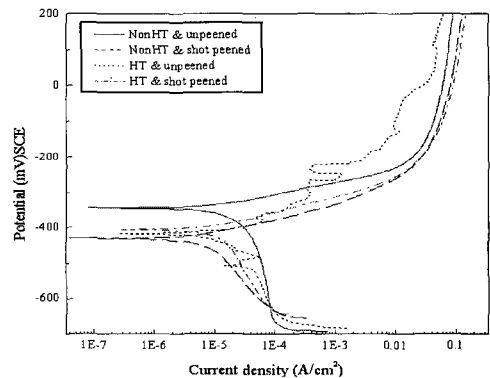


Fig. 12 Polarization curves of specimens

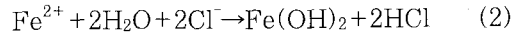
Table 4 Corrosive potential and corrosive current of specimens by Tafel extrapolation method

	E <sub>corr</sub> (mV/SCE)	i <sub>corr</sub> (A/cm <sup>2</sup> )
Non-HT & un-peened	-340	4.2 × 10 <sup>-5</sup>
HT & un-peened	-410	2.7 × 10 <sup>-5</sup>
Non-HT & shot-peened	-420	8 × 10 <sup>-6</sup>
HT & shot-peened	-400	1.3 × 10 <sup>-5</sup>

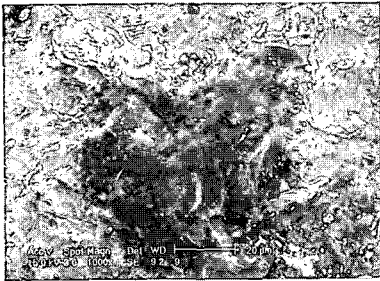
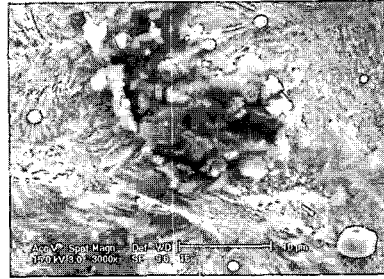
전반적으로 쇼트피닝한 시험편의 경우가 그렇지 않은 시험편에 비해 부식전류가 조금 낮게 나타나고 있다. 이는 쇼트피닝에 의해 생성된 압축잔류응력이 모재의 보호층이나 부식피로균열에 대한 저항력을 높여 부식에 대한 민감도가 떨어진 것으

로 판단된다. 또한 HT & unpeened 시험편이 다소 불안정한 부동태의 양상이 미세하고 나타나고 있다. 이는 다음과 같은 식(2)의 전기화학 반응으로부터 직접 생성된 부동태 피막에 의해 부동

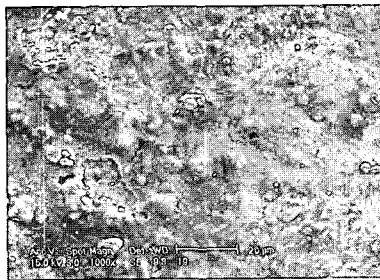
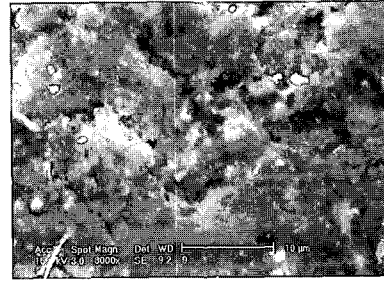
태의 양상이 나타난 것으로 판단된다<sup>[8]</sup>.



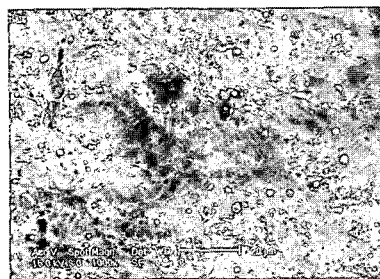
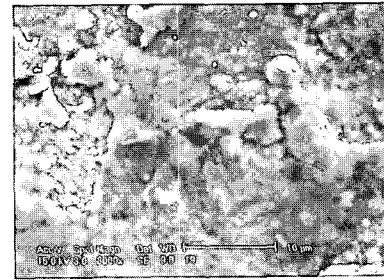
(a) NonHT & unpeened (30 days)



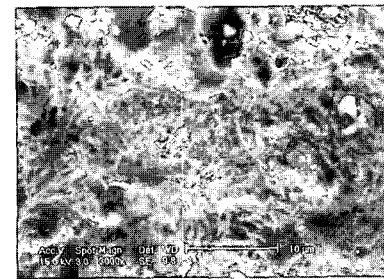
(b) NonHT & shot peened (30 days)



(c) HT & unpeened (30 days)



(d) HT & shot peened (30 days)



**Fig. 13 SEM photographs of corroded surface**

### 3.5 부식표면

Fig. 13은 부식기간 30일 후의 부식표면을 SEM 촬영(X1000배, X3000배)한 사진을 나타내고 있다. Non HT & shot peened 시험편이 불균일한 표면상태로 인해 가장 부식이 심한 표면을 나타내고 있다. 이러한 결과는 표면거칠기의 현상과 중량감소량의 증가경향과 일치한다는 것을 알 수 있다. 반면에 HT & shot peened 시험편의 경우 시간이 경과함에 따라 표면에 균일하게 형성된 압축잔류응력장에 의해 부식의 진행이 다른 시험편에 비해 감소되고 있는 모습을 볼 수가 있다. 또한 각각의 시험편에서 Non HT & unpeened 시험편이 부분적인 양극 활성이 되면서 공식을 발생시켜 국부부식이 심하게 발생한 것을 알 수가 있다. 따라서 공식의 발생에 의해 흑모양의 부식피트(Corrosion pit)의 생성 및 성장과 더불어 이 부식피트 내부에 Cl<sup>-</sup>이온의 농축으로 염화철을 형성함으로써 부식이 가장 활성화 되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 전반적으로 부식 정도에는 차이가 있지만 모든 시험편이 시간에 따른 부식진행이 이루어져 부식피트가 생성되어 있는 것을 알 수 있다.

## 4. 결 론

SAE 5155의 열처리 유무와 쇼트피닝 유무에 따라 3.5% NaCl 수용액에서 부식실험을 하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 쇼트피닝 가공에 있어 열처리 후 쇼트피닝 가공한 시험편은 표면조직의 완화로 더 높은 압축잔류응력이 나타났고, 부식시험 후에는 보호피막의 성장응력과 압축잔류응력과의 상호작용에 의해서 응력감소가 일어났다.
- 2) 무게감소량과 부식속도에 있어서는 Non HT & shot peened 시험편이 가장 높은 무게감소량과 부식속도를 나타내었고, HT & shot peened 시험편이 가장 낮은 무게감소량과 부식속도를 나타내었다.
- 3) 표면조도에 있어서 초기에는 쇼트피닝재가 언피닝재보다 거칠게 나왔으나 시간이 경과함에

따라 오히려 언피닝재가 더 거칠어져 가는 것을 확인할 수 있었다.

- 4) 분극거동에 있어서 쇼트피닝 시험편이 언피닝 시험편보다 부식전류가 낮게 나타났으며, HT & un peened 시험편의 경우 불안정한 부동태의 양상이 나타났다.
- 5) 부식표면 관찰에 있어서 모든 시험편이 부식기간이 지남에 따라 부식피트가 생성될 것을 확인할 수 있었다. 그러나 Non HT & shot peened 시험편의 경우 거칠게 형성된 표면으로 철로 인해 가장 심한 부식표면의 형태를 나타내었다.

## 후 기

이 논문은 두뇌한국 21사업에 의하여 일부 지원되었습니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 박경동, 정찬기, "DIN50CrV4-SAE9254강의 피로강도에 미치는 압축잔류응력의 영향," 한국해양공학회지, 제15권, 제3호, pp.93-99, 2001.
- [2] W. F. Brown, and J. E. Strawley, "Plane Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials", ASTM STP 410, pp. 92-98, 1996.
- [3] 정성균, 이승호, 정석주, "쇼트피닝 가공조건이 피닝강도에 미치는 영향," 대한기계학회지, 제25권, 제10호, pp.1590-1596, 2001.
- [4] 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.
- [5] ASTM, "Standard Test Method for Verifying The Alignment of X-ray Diffraction Instrumentation for Residual Stress Measurement," ASTM



E 915-90, pp.691-693, 1990.

- [6] D. A. Jones, Principles and Prevention of Corrosion, 2nd Edition, Prentice Hall Company, New Jersey. pp.31-34, 1995.
- [7] 임우조, 양학회, 인현만, 이진열, 부식과 방식, 원창출판사, pp.133-137, 1996.
- [8] M. G. Fontana, Corrosion Engineering, 3rd Edition, McGraw-Hill Book Company, New York. pp.320-340, 1986.

## 저 자 소 개



**박경동 (朴卿東)**

1943년 2월생. 1992년 일본동경공업대학 공학박사 학위취득, 1973년 3월 ~ 현재 부경대학교 기계공학부 교수



**안재필 (安宰必)**

1978년 9월생. 2004년 부경대학교 기계공학부 졸업(공학사), 현재 부경대학교 기계공학부 대학원(석사과정)