

## 알루미늄합금 재료의 부식피로거동에 미치는 쇼트피닝 효과에 대한 미시적 분석

김 종 천\* · 정 성 균\*\*†

\* 서울과학기술대학교 NID 대학원, \*\* 서울과학기술대학교 기계공학과

### Microscopic Analysis of Effect of Shot Peening on Corrosion Fatigue Behavior of Aluminum Alloy

Jong Cheon Kim\* and Seong Kyun Cheong\*\*†

\* Graduate School of NID Fusion Technology, Seoul Nat'l University of Science & Technology, \*\* Dept. of Mechanical Engineering, Seoul Nat'l University of Science & Technology.

(Received June 26, 2012 ; Revised August 12, 2012 ; Accepted August 17, 2012)

**Key Words:** Shot Peening(쇼트피닝), Compressive Residual Stress(압축잔류응력), Corrosion Fatigue Behavior(부식피로거동), Fractography(파단면분석)

**초록:** 본 논문에서는 쇼트피닝 가공한 알루미늄 7075-T6 재료의 부식피로향상에 대한 연구를 하였다. 사용된 알루미늄 금속은 상대적으로 가볍고 강한 재료의 특성으로 항공기 주요부품의 재료로 사용되고 있으며, 많은 연구를 통해 알루미늄을 사용하면 약 50%의 무게 감소효과를 낼 수 있다고 한다. 재료의 부식은 인장환경에서 재료의 파단시점을 앞당기고 구조물의 수명을 심각하게 감소시킨다. 따라서 알루미늄 금속의 부식 환경에서의 재료의 부식저항을 향상 시킬 수 있는 연구가 요구된다. 쇼트피닝 가공은 재료 표면에 압축잔류응력을 인가하여 재료의 피로수명을 늘리고 나아가 재료의 신뢰성을 확보하는 기술로 반복하중을 받는 많은 부품들에 이미 적용되어 사용되고 있다. 부식 환경에서는 가공 후 거칠어진 표면으로 인해 공식부식을 야기하지만, 피닝가공에 의한 표면 직하에 압축잔류응력이 부식을 억제하여 부식저항을 증가시킨다. 본 연구에서의 쇼트피닝가공된 시험편에 대한 실험결과와 선행연구에서의 쇼트피닝 가공하지 않은 알루미늄 합금 재료의 부식피로특성을 비교하였다. 실험 결과 쇼트피닝 가공은 알루미늄합금의 피로수명향상에 영향을 미치고, 압축잔류응력은 부식피로수명을 증가시킴을 알 수 있었다.

**Abstract:** The object of this study considers corrosion fatigue improvement of 7075-T6 aluminum by using shot peening treatment on 3.5% NaCl solution at room temperature. Aluminum alloy is generally used in aerospace structural components because of the light weight and high strength characteristics. Many studies have shown that an aluminum alloy can be approximately 50% lighter than other materials. Mostly, corrosion leads to earlier fatigue crack propagation under tensile conditions and severely reduces the life of structures. Therefore, the technique to improve material resistance to corrosion fatigue is required. Shot peening technology is widely used to improve fatigue life and other mechanical properties by induced compressive residual stress. Even the roughness of treated surface causes pitting corrosion, the compressive residual stress, which is induced under the surface layer of material by shot peening, suppresses the corrosion and increases the corrosion resistance. The experimental results for shot peened specimens were compared with previous work for non treated aluminum alloy. The results show that the shot peening treatment affects the corrosion fatigue improvement of aluminum alloys and the induced compressive residual stress by shot peening treatment improves the resistance to corrosion fatigue.

### 1. 서 론

환경문제의 대두로 세계는 친환경 녹색성장이라는 목표아래 새로운 기술개발에 임하고 있다. 특히 대기 환경문제의 원인으로 거론 되고 있는 항공기, 자동차

의 배기가스를 줄이기 위한 노력으로 장치기기의 최적화로 연료소모량을 줄이고 있으며, 이미 다양한 산업분야 에서는 재료의 경량화를 통한 에너지 소비량을 줄이기 위해 복합재료 및 경량금속을 사용하고 있다.<sup>(1,2)</sup> 알루미늄과 마그네슘은 이를 대표하는 경량재료로서 그 적용분야가 확대되고 있다.<sup>(3)</sup> 하지만, 마그네슘은 부식에 대한 저항성능이 낮아 그 활용도에 있

† Corresponding Author, [skjung@seoultech.ac.kr](mailto:skjung@seoultech.ac.kr)  
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

어서 많은 제약이 있다. 반면에 알루미늄 재료는 강한 부식저항 능력과 재활용에 용이하여 매년 그 사용량이 증가하고 있다.<sup>(4)</sup> 앞으로 자동차 시장을 대표할 전기자동차의 주행성능 향상을 위해 배터리 성능 및 구동장치에 대한 연구가 활발히 진행되겠지만, 알루미늄과 같은 경량 재료를 사용함으로써 차량의 무게를 줄이고 효율을 향상시키는 연구도 활발히 진행될 것으로 판단된다. 항공 산업분야에서는 알루미늄 재료를 사용함으로써 비행기 운항자중(operating empty weight)의 약 75%를 감소시키는 효과를 보았고, 자동차 산업에서는 알루미늄 부품의 사용을 통해 100~300kg의 무게를 줄임으로서 약 30~50%가량의 무게 감소를 통한 연비개선 및 배기가스 저감을 연구 중이다.<sup>(4)</sup> 또한 알루미늄 합금의 사용범위가 점차 넓어짐에 따라 부식에 대한 저항성 문제도 중요시 되어 왔으며, 이에 대한 연구들도 꾸준히 소개되고 있다.<sup>(5-7)</sup> Table 1은 알루미늄 합금의 일반적인 유용성들을 보여준다.<sup>(4)</sup> 반복하중을 받는 구조부품이 부식 환경에 있을 때 재료 표면에 공식부식(pitting corrosion)이 형성되고, 부식이 발생한 지점에 국부적인 응력집중이 발생하여 예상치 못한 파괴가 발생하기 때문에 산업 현장에서 큰 문제로 대두되고 있다.<sup>(4,8)</sup> 선행연구에서 알루미늄 합금 재료의 부식 환경에서의 피로거동 특성 연구결과 알루미늄 재료의 산화막 부동태화 특성으로 일정기간 이후부터 부식저항이 증가 한다는 것을 확인하였다.<sup>(9,10)</sup> 하지만, 실제 반복하중을 받는 부식 환경의 구조물에 사용하기 위해서는 초기 부식을 방지하기 위한 후처리 공정이 요구되었다. 쇼트피닝 가공은 부식피로를 방지하기 위한 대책중 하나로 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)을 투사하여 재료 표면에 소성변형(plastic deformation)을 발생시키고 충돌 후 늘어나려고 하는 표면부와 그렇지 않은 내부의 경계층에서 압축잔류응력(compressive residual stress) 형성되어 피로수명을 연장시키고 부식 진전에 대한 저항성을 증가시킨다.<sup>(11,12)</sup>

본 논문에서는 선행연구를 기반으로 사용된 알루미늄 재료의 부식에 대한 부동태화(passivation) 특성 및 부식 환경에서의 쇼트피닝 가공의 효과를 미시적 관점에서 분석하였으며, 실험적(fractography)으로 부식특성을 규명하여 이를 통해 피닝 가공된 알루미늄 합금 재료의 부식거동 특성 및 모델을 제안하고자 한다.

## 2. 실험

본 실험에 사용된 알루미늄 7075-T6 재료는 고강

도 합금으로 항공기 주요부품, 기계부품 및 스포츠 용품에 사용되고 있다. 시효성(aging)이 있는 알루미늄 재료의 T6 온도의 열처리를 통한 최대의 강도를 얻을 수 있지만, SCC(stress corrosion cracking)에 민감하게 반응하는 단점이 있다.<sup>(4,13)</sup> 때문에 이를 방지하는 후처리 공정이 요구된다. Table 2와 Table 3은 각각 재료의 화학적 성분 구성과 기계적 성질을 나타내고 있다. Fig. 1은 시험편의 형상을 나타낸 것이며, 최소 직경이 8mm가 되도록 가공하였다. 또한, 재료 표면을 sand paper 와 metal polish 용액을 사용하여 재료 표면을 연마하여 가공 과정에서 발생 가능한 표면요철을 제거하였다.

**Table 1** The advantageous of aluminum alloy

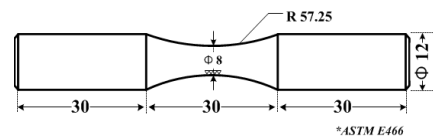
Lightness, Thermal conductivity
Electrical conductivity, Corrosion resistance
Suitability for surface treatments
Diversity of aluminium alloys
Ease of recycling

**Table 2** Chemical composition of aluminum 7075-T6 (wt%)<sup>(10)</sup>

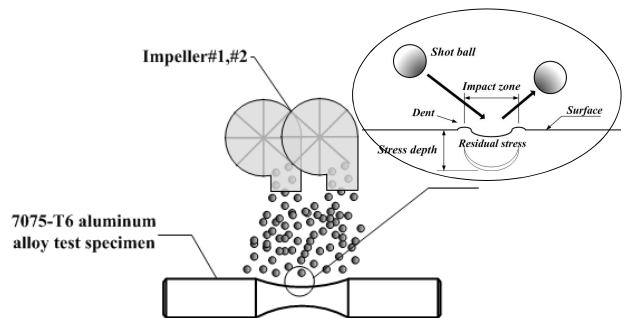
Al	Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Cr	Zn
Bal.	0.14	0.15	0.29	1.60	2.4	0.03	0.19	5.75
				1.65	2.5		0.20	5.8

**Table 3** Mechanical properties of aluminum 7075-T6<sup>(10)</sup>

Element	Ultimate Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
Values	635	578	9



**Fig. 1** Geometry of specimen: rotary bending fatigue test specimen<sup>(10)</sup>



**Fig. 2** Process of the shot peening treatment on aluminum alloy test specimen

2.1 쇼트피닝 가공 및 부식실험

선행연구에서 사용한 방법과 동일한 방법으로 Fig. 2와 같이 시험편에 쇼트피닝가공을 실시하였다. 알루미늄 시험편 중앙 부분에 쇼트볼이 집중 되도록 양단에 보호캡슐을 장착하여 쇼트피닝 가공을 수행하였다. 쇼트피닝가공은 선행연구에서 선정된 최적피닝강도(optimum peening intensity)인 0.341mmA<sup>(9)</sup>으로 실시하였으며 피닝 조건은 Table 4와 같다. 부식실험을 위해서 실제 바다의 평균 염분 농도를 기준으로 부식실험에 적합한 3.5% NaCl(35g salt/l)부식용액을 만들어 사용하였다.<sup>(14,15)</sup> Fig. 3과 같이 밀폐용기를 사용하여 부식액이 담긴 용기 내부의 용존 산소를 제거하였고, 부식기간 동안 NaCl의 침전을 방지하기 위해 일정시간마다 밀폐용기를 교반하였다. 계획된 부식 시간에 도달한 시험편을 부식용기에서 꺼내어 흐르는 물에 염분을 제거하기 위해서 세척을 실시하였으며, 세척 후 상온에서 자연 건조하여 표면 조도계(Mitutoyo, SJ-400)를 상용하여 부식기간별 재료 표면의 중심선 평균값(R<sub>a</sub>) 과 최대 거칠기(R<sub>max</sub>)를 측정하여 부식정도를 평가하였다.

2.2 경도분석

쇼트피닝 가공 후 피닝 영향 범위를 평가하기 위해 재료표면으로부터 경도 분포를 측정하였다. 이를 위해 시험편 중앙부를 채취한 후 절단면을 #2000 sand paper로 표면 평균 거칠기 값(R<sub>a</sub>)이 0.03μm 까지 되도록 연마 하였으며, 마이크로 비커스 경도계(Micro Vickers Hardness tester, JP/FM-7)를 사용하여 표면으로부터 20μm간격으로 경도 분포를 측정하였다.

Table 4 Shot peening process conditions

Content	Shot peening
Shot ball diameter	0.8 mm
Exposure time	6 min
Coverage	above-average 100%
Arc height (Almen A strip)	0.341 mmA

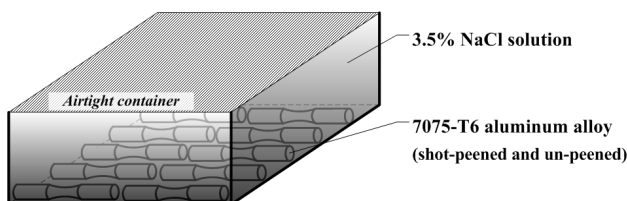


Fig. 3 Schematic view of the experimental set-up for corrosion test

2.3 피로실험

쇼트피닝 가공 처리한 시험편과 그렇지 않은 시험편의 일정 부식기간에 따른 피로거동을 평가하기 위해 4절점 회전굽힘 피로시험기(SHIMADZU, H7)를 사용하여 피로실험을 실시하였다. 피로시험기의 회전수를 2,000±10 rpm으로 일정하게 설정하고 순수 굽힘 응력 상태의 응력 발생을 아래와 같은 식 (1)으로 정의된다.

$$\sigma_b = \frac{M}{I} c = \frac{16PL}{\pi d^3} \quad (1)$$

여기서  $\sigma_b$  : 굽힘 응력 M : 굽힘 모멘트  
 I : 관성모멘트 P : 적용하중  
 L : 모멘트 거리 d : 시험편 직경

2.4 파단면분석

시험편의 부식기간별 부식특성과 피로거동 평가를 위해 주사전자현미경(scanning electron microscopy, SEM)을 이용하여 피로실험에 사용된 환봉 시험편의 파단면분석(fractography)을 실시하였다. 일반적으로 회전 굽힘 피로실험에서 모든 피로균열은 외부 표면에서부터 발생하여 내부로 진전하게 된다.<sup>(16)</sup> 때문에 초기크랙(initial crack)의 발생 지점을 통해 균열파단 특성을 나타내게 되는데, 본 실험에서는 쇼트피닝 가공한 시험편과 가공하지 않은 시험편의 피로파단면 분석을 통해 피닝 가공으로 인가된 압축잔류응력이 부식 환경에서의 알루미늄 재료의 피로거동 특성에 어떻게 영향을 미치는지 분석 하였다.

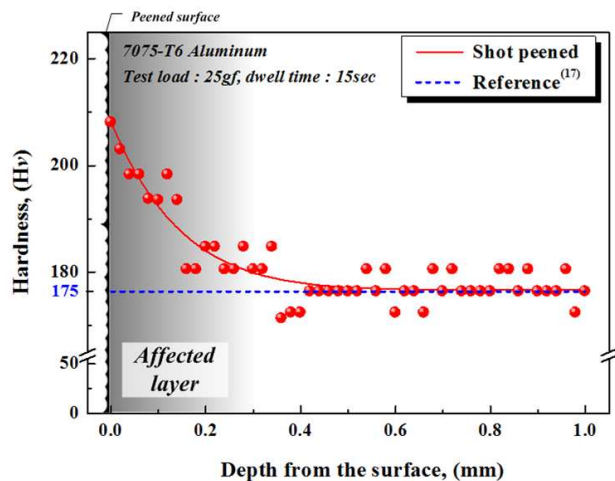


Fig. 4 Vickers hardness distribution of shot peened material

### 3. 결과 및 고찰

일반적으로 재료의 표면 상태는 재료의 피로수명에 큰 영향을 준다. 쇼트피닝 가공으로 인해 발생된 표면 압축잔류응력 효과가 재료의 표면요철부로부터 발생한 피로수명 손실보다 큰 영향을 미치기 때문에 전체적인 피로수명은 크게 향상했다. Fig. 4는 피닝 가공 후 재료 표면으로부터 깊이에 따라 경도 값을 측정된 결과로 약 250 $\mu\text{m}$ 까지 피닝 가공으로 인한 영향범위가 형성되었음을 확인 할 수 있다. Fig. 5는 피닝 가공한 시험편과 가공하지 않은 시험편의 부식기간에 따른 피로수명 특성을 보여준다. 피닝 가공한 시험편의 경우 부식기간이 증가하면 피로수명 감소량이 다소 완만하게 진행된다. 특히 피로수명이 일정하게 수렴하는 8주를 기준으로 그 감소량은 약 33%로 확인되었다. 이와 달리 피닝가공 하지 않은 시험편의 경우 부식기간이 4주일 때부터 피로수명이 수렴하는 경향을 보였으며, 그 감소량은 약 63%로 확인된다. Fig. 6은 부식기간별 재료표면의 부식 정도를 평가하기위해 평가길이(evaluation length)가 4mm인 표면 거칠기 데이터 중에 중심선 평균값( $R_a$ )과 최대 거칠기( $R_{max}$ )를 측정된 결과로 중심선 평균값은 4주 동안의 부식으로 6.4  $\mu\text{m}$ 에서 7.53  $\mu\text{m}$ 으로 증가하였으며, 최대 거칠기 값은 31.5  $\mu\text{m}$ 에서 39.4  $\mu\text{m}$ 로 증가하였다.

이 같은 결과는 피닝 가공으로 인해 선행연구<sup>(10)</sup>의 피닝 가공하지 않은 시험편 보다 피닝 가공으로 표면에 발생된 Fig. 2의 요철부위(dent) 때문에 부식이 발생하기 용이한 환경이 되었기 때문으로 판단된다.

하지만, Fig. 6의 부식 기간별 데이터 분석을 통해 초기 부식 진전은 활발히 진행 되었지만 4주가 지나면서부터 그 속도가 상대적으로 감소하는 결과를 얻을 수 있었다. 이 결과는 사용된 알루미늄 재료의 활발한 초기부식 특성과 산화막 부동태화 특성으로 판단되며, Fig. 7의 일반적인 알루미늄 재료의 부식 경향과 상응하는 것을 알 수 있다.<sup>(4)</sup> 쇼트피닝가공으로 인해 알루미늄 7075-T6 재료 표면에 인가된 압축잔류응력<sup>(18)</sup>이 부식피로거동에 미치는 영향을 미시적으로 평가하기 위하여 파단면 분석을 실시하였다.

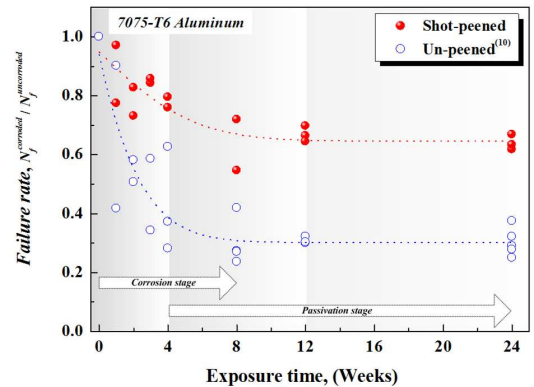


Fig. 5 Effect of corrosion exposure duration on fatigue life

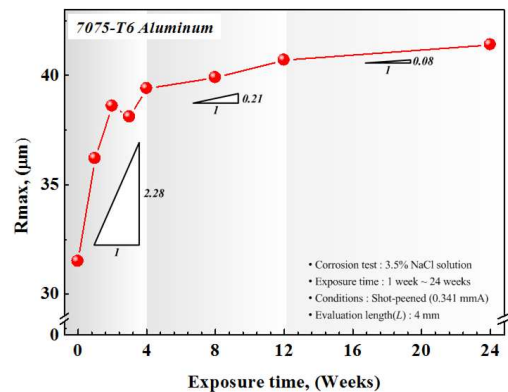
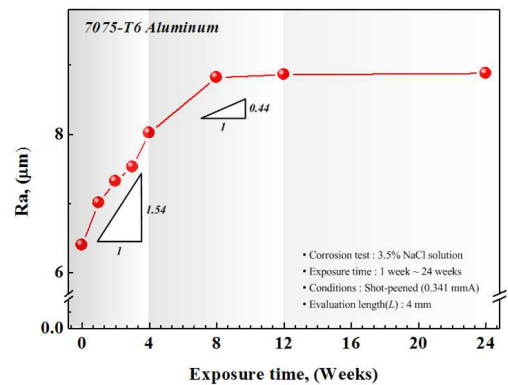


Fig. 6 Effect of corrosion exposure duration on surface roughness of shot peened specimen:  $R_a$ (top) and  $R_{max}$ (bottom)

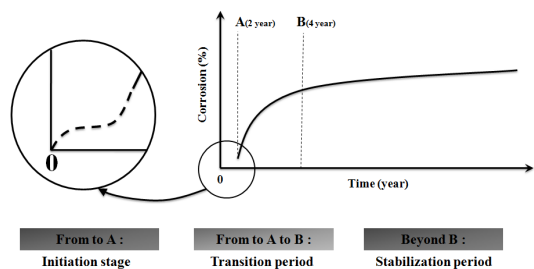
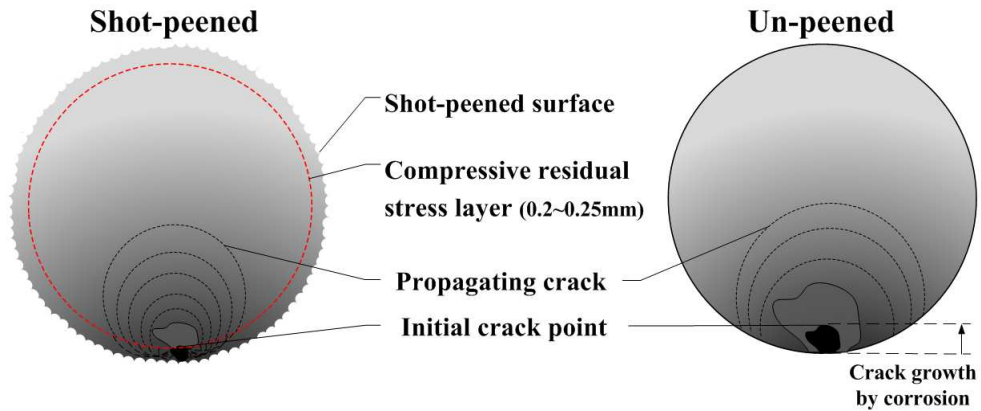
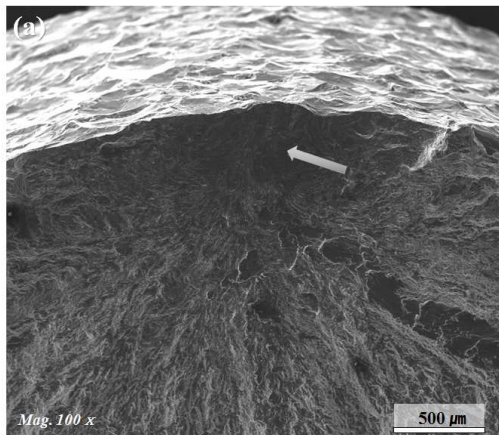


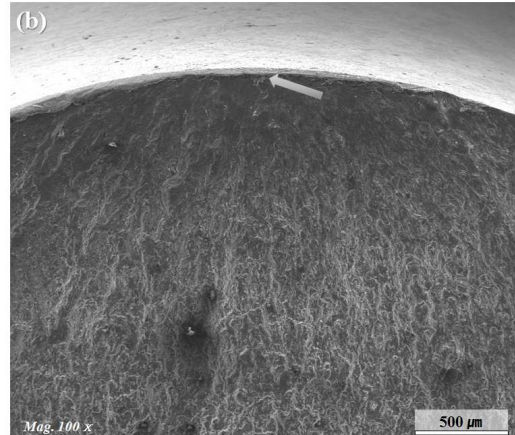
Fig. 7 Stages of atmospheric corrosion of aluminium<sup>(4)</sup>



**Fig. 8** Schematic illustration for the model of crack propagation under corrosion environment: shot-peened(left) and un-peened(right)

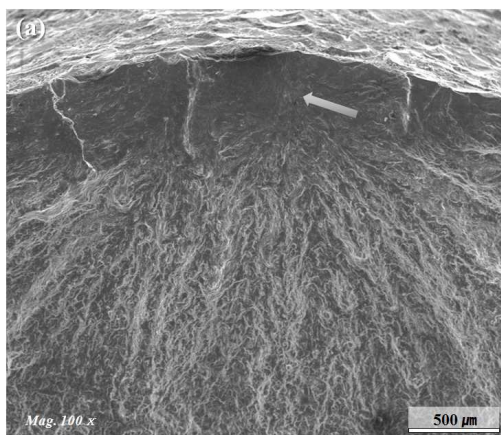


(a) Shot-peened and uncorroded



(b) Un-peened and uncorroded

**Fig. 9** SEM fractography of 7075-T6 aluminum fatigue fracture surface, an arrow indicates the initial crack point: (a) shot-peened fracture surface; and (b) un-peened fracture surface

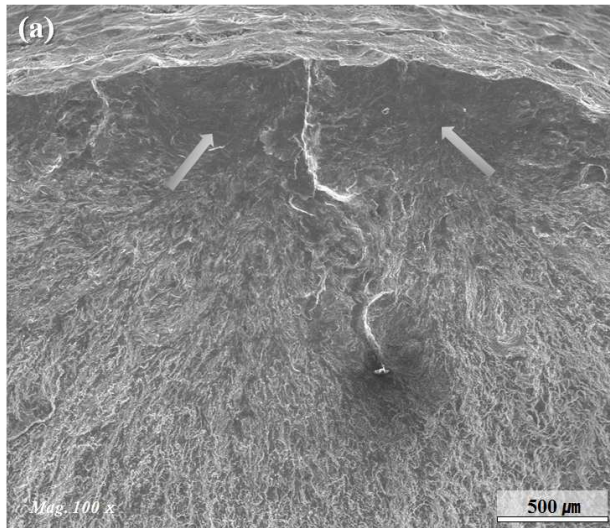


(a) Shot-peened and corroded for 4 weeks

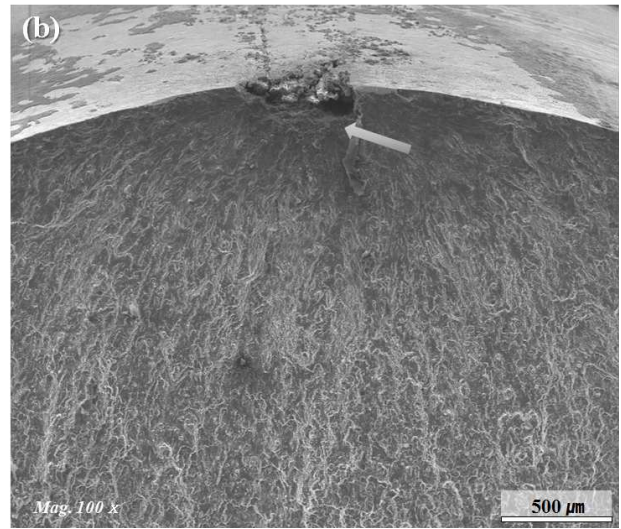


(b) Un-peened and corroded for 4 weeks

**Fig. 10** SEM fractography of corrosion fatigue test for 7075-T6 aluminum in 3.5% NaCl solution, an arrow indicates the initial crack point: (a) shot-peened fracture surface; and (b) un-peened fracture surface

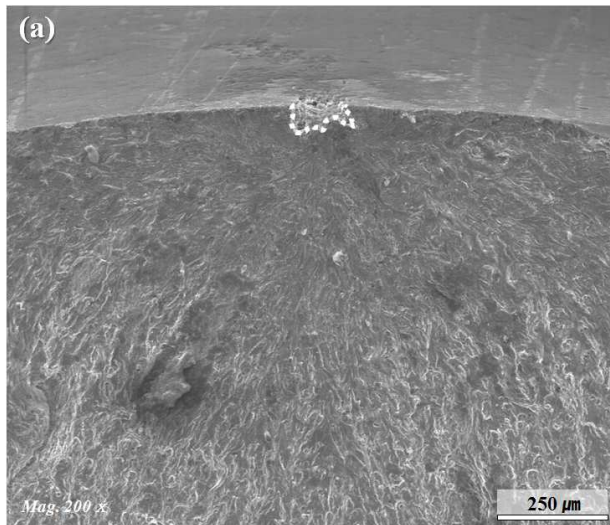


(a) Shot-peened and corroded for 8 weeks

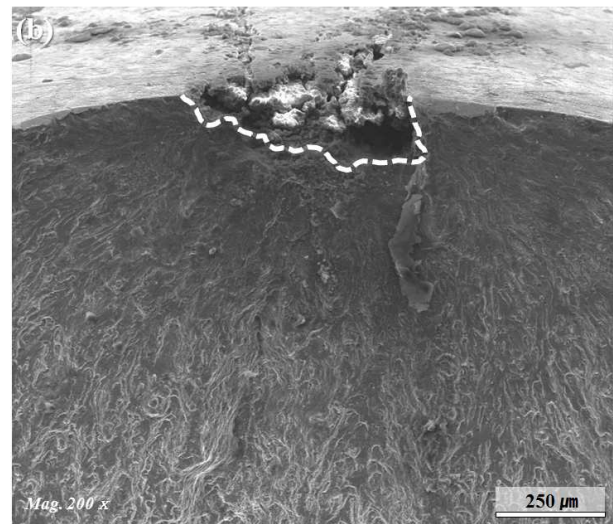


(b) Un-peened and corroded for 8 weeks

**Fig. 11** SEM fractography of corrosion fatigue test for 7075-T6 aluminum in 3.5% NaCl solution, an arrow indicates the initial crack point: (a) shot-peened fracture surface; and (b) un-peened fracture surface



(a) Un-peened with corroded for 4 weeks



(b) Un-peened and corroded for 8 weeks

**Fig. 12** Comparison of corrosion fatigue fracture surface for subsurface pit growth in the initiation point: (a) un-peened and corroded for 4weeks; and (b) un-peened and corroded for 8weeks. The critical pits are marked with a dotted line

Fig. 8은 선행연구<sup>(10)</sup>의 사용된 알루미늄 금속의 부식 환경에서의 산화막 부동태화(passivation) 특성과 쇼트피닝 가공의 내부피로파괴(internal fatigue fracture) 특성을 바탕으로 부식 환경에서의 피닝 가공한 시험편과 그렇지 않은 시험편의 부식 환경에서의 피로거동 특성을 도시적으로 모델화하였다. 피닝 가공처리를 하지 않은 시험편

의 경우에는 초기크랙이 부식이 발생한 재료 표면으로 부터 발생되어 균열이 진전되지만, 쇼트 피닝가공 처리한 시험편의 경우에는 피닝 가공으로 내부에 발생한 압축잔류응력 때문에 초기크랙의 위치가 표면 직하로 이동하게 되어 표면 부식이 발생하더라도 피로수명에 큰 영향을 미치지 않은 것으로 판단된다.<sup>(18)</sup> Fig. 9는 쇼트피닝 가공

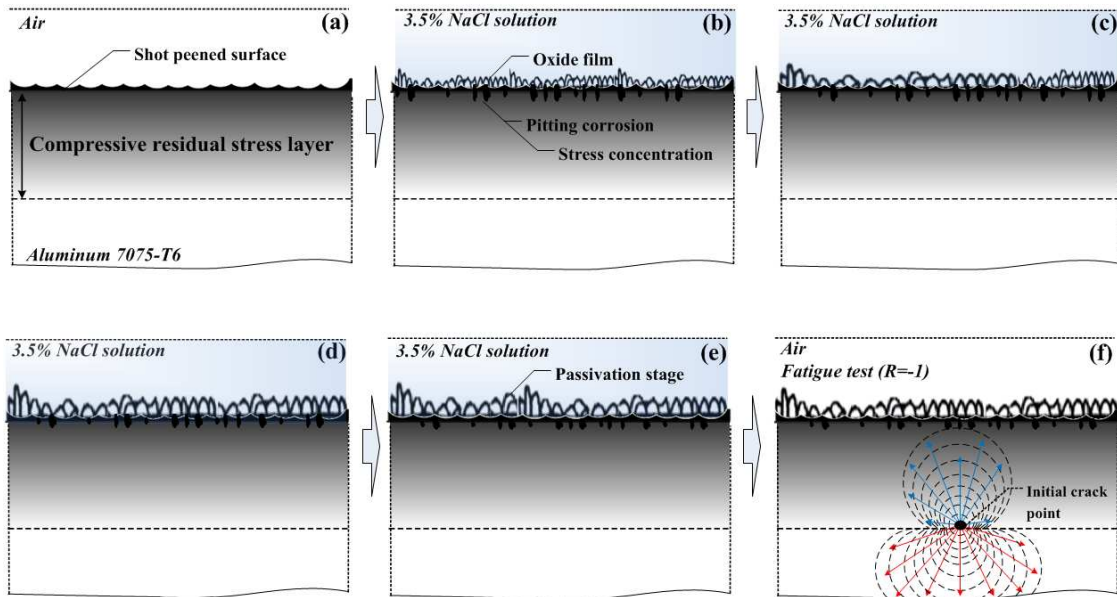


Fig. 13 Schematic illustration of the assumption used in the modeling of pitting corrosion growth and initial crack point on 3.5% NaCl solution; shot peened specimen

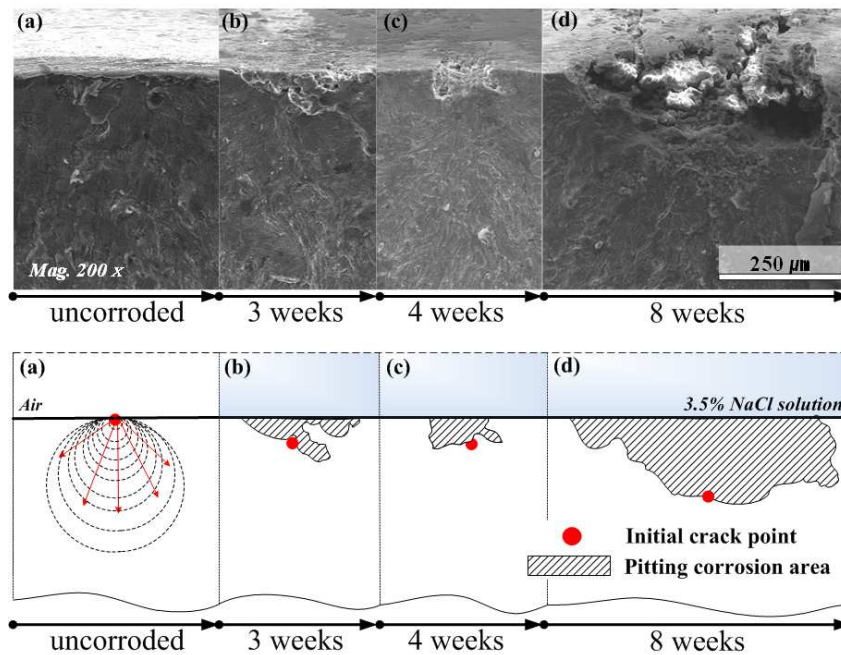


Fig. 14 Schematic illustration of the assumption used in the modeling of pitting corrosion growth and initial crack point on 3.5% NaCl solution; unpeened specimen

한 시험편과 가공하지 않은 시험편에 대해 부식 시키지 않은 상태에서의 피로 파단면이다. 쇼트 피닝 가공으로 인해 표면에 많은 요철부위가 발생하였지만, 초기크랙(initial crack)발생지점이 표면으로부터 약 200~250 $\mu$ m 떨어진 곳에서 발생하였음을 확인할 수 있다. 쇼트피닝 가공으로 인해

재료 표면부에 최대압축잔류응력이 0.2~0.25mm 깊이에 형성되어<sup>(18)</sup> 크랙 발생에 필요한 인장환경 분위기 발생을 방지함으로써 피로수명 향상을 기대할 수 있다. 반면에 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 파단면을 보면 초기크랙의 발생지점이 재료 표면으로부터 발생하였음을 알 수 있다.

Fig. 10, Fig. 11은 일정 부식 기간별 재료의 파단면 특성을 분석한 것으로 부식 환경에서 쇼트피닝가공 시험편의 경우에는 내부로의 부식 진전이 눈에 띄게 이뤄지고 있지 않음을 보여주고 있다. 반면에 피닝 가공을 하지 않은 시험편에서는 초기 크랙이 표면으로부터 발생하였고, Fig. 12는 표면에 발생한 공식부식(pitting corrosion)을 보여주고 있다. 상대적으로 피닝 가공한 시험편은 가공하지 않은 시험편과 대조적으로 4주의 부식 기간 동안 불규칙적이지만 모든 재료 표면에 산화막이 형성되었다. 이 결과는 피닝 가공으로 재료 표면에 요철부위가 많아 부식이 쉽게 발생하였음을 알 수 있다. Fig. 13은 연구결과를 바탕으로 피닝 가공된 알루미늄 재료의 부식거동 특성을 나타낸 것으로 피닝 가공으로 형성된 표면 요철로 초기 부식이 상대적으로 활발히 진행되지만, 재료의 부식에 대한 부동태화 특성 및 피닝 가공의 효과로 부식에 대한 저항 능력이 증가하였음을 확인하였다. 하지만, Fig. 14의 피닝 가공하지 않은 시험편은 재료 표면에 부식 환경에서 공식부식(pitting corrosion)이 성장하였음을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 쇼트피닝가공을 이용하여 사용된 알루미늄 7075-T6 재료의 부식 환경에서의 부동태화 특성 및 피로 거동특성에 미치는 영향에 대한 연구를 진행하였으며, 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 쇼트피닝가공으로 인해 생성된 표면요철부위 때문에 불규칙 적으로 활발한 초기부식이 진행되어 재료표면에 산화막이 생성되었다.

(2) 이 같은 초기부식으로 8주 동안 약 33%의 피로수명 감소가 발생하였지만, 선행연구의 피닝 가공하지 않은 시험편의 초기 4주 동안의 약 63%의 감소량보다 낮은 피로수명 감소 결과를 얻었다. 피닝 가공으로 인가된 압축잔류응력의 효과로 인한 내부피로파괴 특성 때문에 상대적으로 표면 부식으로부터 균열 진전을 억제하기 때문으로 판단된다.

(3) 깊이별 경도분포 평가결과 표면으로부터 약 250 $\mu\text{m}$ 까지 피닝 영향범위가 형성되었음을 확인하였으며, 이 같은 결과는 파단면 분석을 통해 재료 내부에서 발생한 초기 크랙의 위치와 상응하는 것을 확인하였다.

(4) 표면 거칠기 평가결과에서 피닝 가공으로 중심선 평균값은 4주 동안의 부식으로 6.4 $\mu\text{m}$ 에서 7.53 $\mu\text{m}$ 으로 증가하였으며, 최대 거칠기 값은 31.5 $\mu\text{m}$ 에서 39.4 $\mu\text{m}$ 로 증가하였다. 하지만, 4주 이후부터 표면 거칠기 값의 증가량이 둔화되는 경향을 보였다.

(5) 이 같은 결과는 쇼트피닝 가공으로 발생한 표면 요철부 때문에 활발한 초기부식이 발생 하였지만, 알루미늄 재료의 부식 환경에서의 산화막 부동태화 특성으로 인해 더 이상의 부식이 진행되지 않아 피로수명 및 표면 거칠기 평가 데이터 측정결과에서 부식 경향이 둔화되는 것으로 판단된다.

(6) 부식 환경의 알루미늄 재료의 미식적 피로 거동 특성 및 원인 분석 결과를 바탕으로 쇼트피닝 가공으로 발생한 압축잔류응력의 효과를 가공하지 않은 시험편의 특성과 비교하여 Fig. 13, Fig. 14에 도시하였다.

#### 참고문헌

- (1) Yu, S. H., Kim, J. H., Son Y. D. and Kim, Y. B. 2005, "Light Weight Suspension Component and Vehicle Performance Evaluation," *Trans. of the KSAE*, Vol 11, pp. 1362~1367.
- (2) Han, S. W. and Jung, H. S., 2011, "Weight Reducing of Aluminum Extrusion Profiles of a Railway-Car Body Based on Topology and Size Optimization," *Trans. of the KSME*, Vol. 35, No. 2, pp. 213~221.
- (3) Khan, S. A., Md. S. B., Miyashita, Y. and Mutoh, T. 2010, *Materials Science and Engineering A*, Vol. 528, Issues 4~5, pp. 1961~1966.
- (4) Christian Vargel, 2004, *Corrosion of Aluminium*, Elsevier, pp. 9~291.
- (5) Hill, J.-A., Tracey, M., Maria, F., Patrick, C. H. and Bruce, R. W., Hinton, 2011, "Corrosion Inhibition of 7000 Series Aluminium Alloys with Cerium Diphenyl Phosphate," *Journal of Alloys and Compounds*, Vol. 509, Issues 5, pp. 1683~1690.
- (6) Jones, K. and Hoepfner, D. W., 2009, "The Interaction Between Pitting Corrosion, Grain Boundaries, and Constituent Particles During Corrosion Fatigue of 7075-T6 Aluminum Alloy," *International Journal of Fatigue*, Vol. 31, Issues 4,



- pp. 686~692.
- (7) Chlistovsky, R. M., Heffernan, P. J. and DuQuesnay, D. L., 2007, "Corrosion-Fatigue Behaviour of 7075-T651 Aluminum Alloy Subjected to Periodic Overloads," *International Journal of Fatigue*, Vol. 29, Issues 9~11, pp. 1941~1949.
- (8) Kang, D. H., Choi, S. W., Lee, J. K. and Kim, T. W., 2009, "Load Conditions and Corrosion Fatigue Crack Propagation Behavior of High Performance Steel Under Seawater Environment," *Trans. of the KSME(Spring Annual Meeting)*, pp. 78~81.
- (9) Cheong, S. K, Nam, J. H., Kou, D. R. and Ro, S. N., 2005, "A Study on the Effect of Shot Peening on the Fatigue Life of Al 7075-T6 under Corrosion Environment," *Trans. of the KSAS*, Vol. 33, Issues 2, pp. 60~66.
- (10) Kim, J. C. and Cheong, S. K, 2012, "Effect of Oxide Film Formation on the Fatigue Behavior of Aluminum Alloy," *Trans. of the KSME A*, Vol. 36, No. 4, pp. 421~428.
- (11) Iida, K., 1984, "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening," *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, Chicago, pp. 283~292.
- (12) Shin, Y. S., Jeong, S. K. and Seo, Y. W., 1998, "Fatigue Characteristics of SCM 22 Steel by Shot Peening," *Journal of the KSMTE*, pp. 126~13.
- (13) Lin, C. K. and Yang, S. T., 1998, "Corrosion Fatigue of 7975 Aluminum Alloy in Different Tempers," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 59, No. 6, pp. 779~795.
- (14) Lyman, J. and Abel, R.B., 1958, "Chemicals Aspects of Physical Oceanography," *Journal of Chemical Education*, Vol. 35, pp. 113~115.
- (15) Huppertz, W. and Meissner, H., 1987 "Effect of the Temperature and Salt Content of Sea Water on the Corrosion Behavior of Aluminium," *Werkstoffe und Korrosion*, Vol. 38, pp. 709~710.
- (16) Ameen, M. S., 1995, "Fractography: Fracture Topography as a Tool in Fracture Mechanics and Stress Analysis. an Introduction," *Geological Society Special Publication*, No. 92, pp. 1~10.
- (17) Metals Handbook, 2001, Vol.2 - Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special-Purpose Materials, *ASM International 10th Ed.*
- (18) Zupanc, U. and Grum, J., 2010, "Effect of Pitting Corrosion on Fatigue Performance of Shot-Peened Aluminum Alloy 7075-T651," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 210, Issue 9, pp. 1197~1202.