

## Al7075-T6의 압축잔류응력 및 피로 수명에 미치는 재피닝의 효과

오성훈<sup>a</sup>, 이용성<sup>b</sup>, 정성균<sup>c\*</sup>

## Effects of Re-Peening on the Compressive Residual Stress and Fatigue Life of Al7075-T6

Sung-Hun Oh<sup>a</sup>, Yong-Sung Lee<sup>b</sup>, Seong-Kyun Cheong<sup>c\*</sup><sup>a</sup> Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School of Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea<sup>b</sup> Center for Energy System Research, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea<sup>c</sup> Dept. of Mechanical and Automotive Engineering, Seoul National University of Science and Technology, 232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul 01811, Korea

## ARTICLE INFO

## Article history:

Received	6	April	2016
Revised	17	June	2016
Accepted	6	July	2016

## Keywords:

Shot peening  
Re-peening  
X-ray diffraction  
Fatigue test  
Fatigue ratio  
Compressive residual stress

## ABSTRACT

The effects of re-peening on the compressive residual stress and fatigue life of Al7075-T6 were investigated. The compressive residual stress induced on the surface of components by shot peening is known to increase the fatigue life. However, the fatigue load relaxes the compressive residual stress of components. Re-peening is a technique to again induce the relaxed compressive residual stress and increase the total fatigue life of components. In this study, the re-peening process was applied to fatigue-loaded specimens. The compressive residual stress and fatigue life were examined for re-peened specimens with fatigue ratios of 30%, 50%, and 70%. The results showed that the compressive residual stress of the specimens was relaxed under the fatigue load. The re-peening process significantly increases the compressive residual stress and total fatigue life.

## 1. 서론

쇼트피닝(shot peening)은 쇼트볼(shot ball)이라 불리는 강구 등을 사용하여 재료의 표면을 강타함으로써, 재료의 표면과 소성변형을 일으켜 표면과 그 직하에 압축잔류응력(compressive residual stress)을 부여하여 피로 강도 및 수명을 비약적으로 향상시키는 표면 가공의 일종이다<sup>[1,2]</sup>. 피로 수명 향상을 위해 스프링이나 기어 등의 반복 하중을 받는 부품에 다양하게 사용되고 있다.

하지만 쇼트피닝 가공으로 부품의 표면 직하에 형성된 압축잔류응력은 반복적인 피로하중 하에서 완화되며 영구적으로 유지되는 것이 아니다<sup>[3]</sup>. 반복적인 피로 하중으로 인해 완화된 부품 표면의 압축잔류응력을 회복시키기<sup>[4]</sup> 위해 추가적인 쇼트피닝 가공을 다시 실시하게 되며 이를 재피닝(re-peening)이라고 한다<sup>[5]</sup>. 고부가가치 부품의 수명이 다하기 전에 추가적인 재피닝 공정으로 피로수명을 연장시킴으로써 비용을 절감하고 자원을 효율적으로 사용하는 것을 가능하게 한다. 고강도 알루미늄 합금인 Al7075-T6은 경

\* Corresponding author. Tel.: +82-2-970-6330

Fax: +82-2-949-1458

E-mail address: skjung@seoultech.ac.kr (Seong-Kyun Cheong).

량화를 필요로 하면서도 강도를 요구하는 항공기 등의 구조물이나 반복 응력을 받는 기어와 샤프트에 사용되는 중요한 재료이다.

본 연구에서는 Al7075-T6 소재에 대한 재피닝 전후의 압축잔류응력과 그 수명을 비교하고, 사용 전후와 재피닝 후의 압축잔류응력의 변화와 그 효과를 확인하여 Al 합금을 사용하는 부품의 내구 수명 향상을 위한 기술 자료를 제시하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 재료 및 시험편

본 연구에 사용한 재료는 Al707-T6이며 시험편의 형상은 ASTM E466 규격<sup>6)</sup>에 따라 제작한 것으로 Fig. 1과 같다.

### 2.2 쇼트 피닝 및 재피닝 가공

Fig. 2는 쇼트 피닝 가공에 사용한 임펠러 타입 쇼트 피닝 머신 (PMI-0608)이다. 쇼트 피닝 가공에 사용한 쇼트볼은 SWRH 72A의 rounded cut wire shot ball로서 경도는 약 670 Hv이다. 쇼트 피닝 조건은 Al7075-T6의 최적 피닝 강도로 파악한 선행 연구

결과인 0.34 mmA로 Table 1과 같은 조건으로 가공하였다<sup>7)</sup>. 이후에 실시한 재피닝 또한 쇼트피닝과 같은 조건으로 실시하였다. Arc height는 Almen strip을 Almen block에 고정하여 쇼트피닝을 실시한 후 strip에 부여된 압축잔류응력으로 인해 구부러진 정도로 쇼트피닝의 강도를 나타내는 방법이다. Coverage는 광택을 낸 Almen strip을 쇼트피닝 후 표면을 현미경으로 촬영하고 contrast를 부여하여 측정하였다.

### 2.3 조도 측정

쇼트 피닝 가공하지 않은 시험편과 쇼트피닝 가공한 시험편 그리고 재피닝 가공한 시험편의 표면 조도 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 쇼트피닝 가공으로 인해 표면조도 값이 쇼트피닝을 실시하기 전보다 크게 상승한 것을 확인할 수 있다. 하지만 쇼트피닝을 실시한 시험편의 조도값과 재피닝한 시험편의 조도값은 증가하는 경향을 보였지만 큰 차이를 보이지 않았다.

Table 1 Shot peening conditions

Shot ball diameter	0.8 mm
Impeller diameter	250 mm
Impeller frequency	63 Hz
Shot velocity	61.3 m/s
Exposure time	3 min
Coverage	Over 100%
Arc height	0.340 mmA

Table 2 Surface roughness of each condition

	Un-peened (μm)	Optimum peened (μm)	Re-peened (μm)
Ra	0.18	8.78	10.74
Ry	1.7	46.4	48.3
Rz	#1.0	#36.4	#37.2
Rq	0.26	11.15	12.93

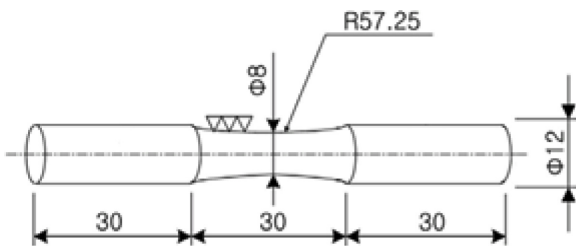


Fig. 1 Rotary bending fatigue test specimen (unit : mm)



Fig. 2 Shot peening machine (PMI-0608)



Fig. 3 Rotary bending fatigue test machine

### 2.4 피로 시험

피로시험기는 Fig. 3에 나타난 회전 굽힘 피로시험기(오노식 회전 굽힘 피로시험기)를 사용하였다. 피로시험에서는 적용응력( $\sigma_a$ )을 Al7075-T6의 최대 인장응력(572 MPa)의 52%에 해당하는 298.4 MPa를 부가하여 실시하였다. 그리고 이를 바탕으로 재피닝 전후의 압축잔류응력변화와 수명 간의 관계를 알아보기 위해 쇼트 피닝 가공 완료한 시편의 적용응력에서의 수명( $N_f \approx 1.3 \times 10^5$ )을 측정하였다. 그리고 그 수명을 기준으로 하여 Table 3와 같이 30%, 50%, 70%의 손상비(fatigue ratio,  $N/N_f$ )를 기준으로 회전 굽힘 피로( $N$ )를 부여하고 각각 재피닝 가공하여 다시 파단까지의 피로 수명 시험을 실시하여 수명을 측정하였다.

### 2.5 압축잔류응력 평가

피로 수명 진행 과정에 따라 압축잔류응력이 어떻게 감소하는지 그리고 재피닝으로 잔류응력의 회복에 어떤 영향을 미치는지 확인하기 위해 XRD 장비를 이용하였다. 먼저 쇼트피닝이 완료된 시편의 잔류응력을 측정하고 이어서 30%, 50%, 70%의 피로시험이 진행된 시편에 대해 잔류응력을 측정하였으며 재피닝을 실시한 후에 잔류응력을 다시 측정하였다. 시편의 압축 잔류응력은 중앙의 표면에서 측정하였으며 측정 조건은 Table 4에 나타내었다<sup>[8]</sup>.

## 3. 결과 및 고찰

피로 수명 측정 후 파단면을 관찰한 결과, Fig. 4에 나타난 것과 같이 시편의 표면이 아닌 표면 아래에서 파괴가 시작되는 양상을 보였다. Fig. 4는 손상비 30%에서 재피닝을 실시한 시편의 파단면으로 fish-eye와 크랙이 전파된 흔적을 관찰할 수 있다. 쇼트피닝

가공으로 인해 조도값이 상승하였음에도 동시에 부여한 압축잔류응력에 의해 크랙은 표면에서 발생하지 않고 표면 직하에서 발생하는 전형적인 쇼트 피닝 가공된 시편의 피로 파단면을 보이고 있다.

Fig. 5은 부가한 피로 손상비에 따른 시편의 표면 압축잔류응력을 나타낸 것이다. 피로 손상이 진행됨에 따라 압축잔류응력이 이완됨을 보여주고 있다. Fig. 6은 피로 시험 비율에 따른 재피닝 전후의 압축 잔류응력을 나타낸 것으로 모든 시편의 경우에 압축 잔류응력의 크기는 증가하였다. 특히 70% 시기에 재피닝 하는 것이 압축잔류응력 크기의 증가량이 가장 높았으며 이는 잔류응력 부여의 효율성으로 보았을 때 가장 효과적이었다. 하지만 재피닝 후의 압축잔류응력의 크기는 30% 시기에 실시한 것이 가장 높았다.

수명측정 결과는 Fig. 7에 나타내었으며 피로 하중 298.4 MPa를 적용하였을 때 모든 시편의 수명이 증가함을 확인할 수 있었다. 일반적으로 피로 시험에서는 같은 조건일 때 조도가 높으면 피로

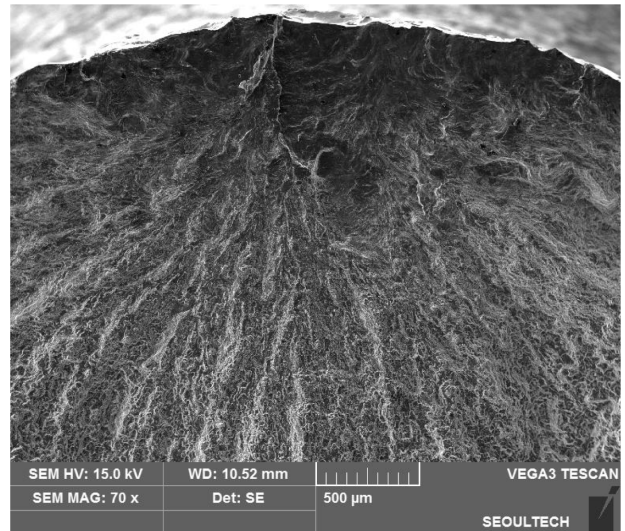


Fig. 4 SEM micrographs of test specimen's fracture surface

Table 3 Pre-fatigued cycles before re-peening

$\sigma_a$ (MPa)	$N_f$ (cycles)	$N/N_f$ (%)	$N$ (cycles)
298.4	$1.3 \times 10^5$	30	$3.9 \times 10^4$
		50	$6.5 \times 10^4$
		70	$9.1 \times 10^4$

Table 4 Residual stress measurement conditions

XRD	Condition	
X-Ray source	Target	Cu-K $\alpha$
	Voltage	40 kV
	Current	30 mA
2 $\theta$	113°-119°	
Diffraction	Scintillation counter	
Method	Half-value-breadth Sin2 $\psi$	

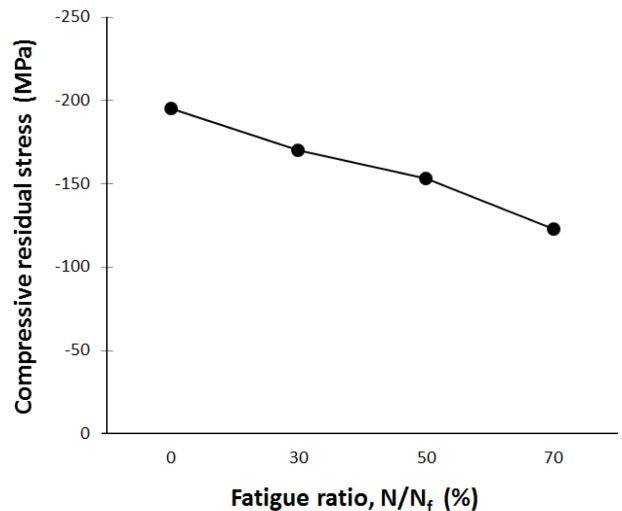


Fig. 5 Compressive residual stress for each fatigue ratio

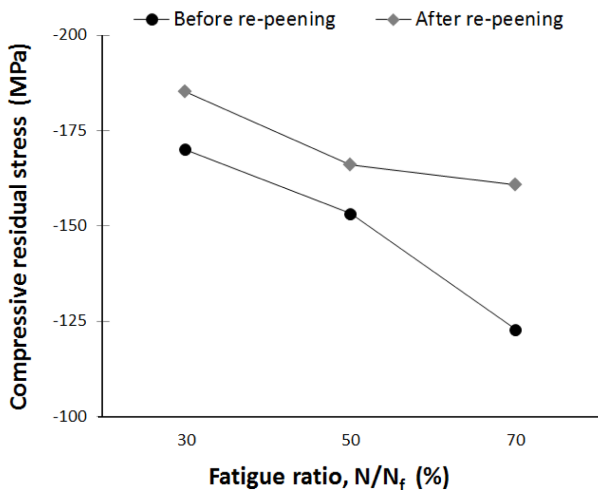


Fig. 6 Compressive residual stress change after re-peening for each fatigue ratio

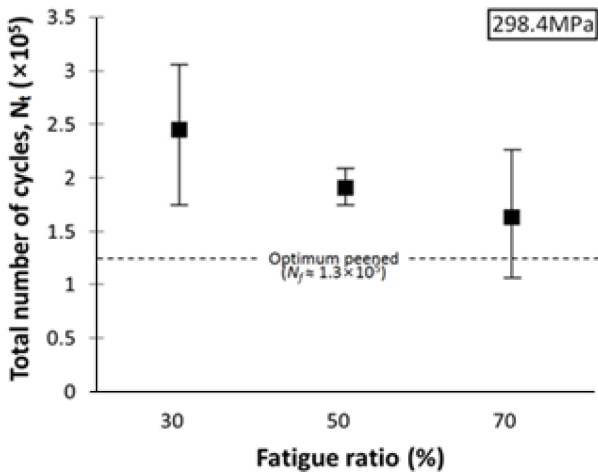


Fig. 7 Average fatigue life of re-peened specimens

수명이 감소하는 경향을 보였으나 재피닝 결과 조도값이 증가하였음에도 수명이 향상되었으며 이는 재피닝으로 인해 부여된 압축잔류응력의 영향으로 보인다. 재피닝 시편 중 가장 높은 수명 증가를 보인 시편은 30%의 피로하중 부가 후 재피닝을 한 시편으로 해당 시편의 총 수명( $N_f \approx 2.45 \times 10^5$ )은 재피닝 하지 않은 시편의 수명( $N_f \approx 1.31 \times 10^5$ )의 약 1.87배로 87% 증가하였다. 이어서 총 수명은 50%( $N_f \approx 1.91 \times 10^5$ ), 70%( $N_f \approx 1.63 \times 10^5$ ) 사용 후 재피닝한 시편 순으로 나타났다.

마찬가지로 Al7075-T6를 사용하여 재피닝을 실시한 다른 논문에서는 피로 손상비를 20%, 40%, 60%, 80%로 나누어 측정된 결과 본 연구에서 얻은 결과와 달리 60%의 시험편의 수명이 40.5%로 가장 높은 수명 증대 효과를 얻었다고 한다<sup>[9]</sup>. 다만 이는 본 연구에서는 적용한 응력( $\sigma_a = 298.4$  MPa)이 해당 논문에서 적용한 응력( $\sigma_a = 258.6$  MPa)보다 높고 이에 따라 재피닝 가공 전의 피로 수명( $N_f \approx 5.73 \times 10^5$ )이 본 연구에서의 피로 수명( $N_f \approx 1.3 \times 10^5$ )

의 4배 이상 높았다. 위와 같은 조건 차이로 인해 재피닝의 효과가 달라진 것으로 보인다. 또한 본 연구에서는 시편의 압축잔류응력을 측정하여 증가한 수명에 대한 근거로 제시하였다.

또한 재피닝 가공한 SM45C의 피로 수명 증대효과를 분석한 논문에서는 고응력 조건( $N_f \approx 8.7 \times 10^4$ )과 저응력 조건( $N_f \approx 6.08 \times 10^5$ )으로 나누어 재피닝으로 인한 수명 증대 효과를 비교하였는데 저응력 조건에서는 손상비 50%에서 최대 12%의 수명 증대 효과, 고응력 조건에서는 마찬가지로 손상비 50%에서 57.5%의 피로 수명 증대 효과가 있었다고 한다<sup>[10]</sup>. 해당 논문에 의하면 재피닝은 저응력 조건보다 고응력 조건에서 더욱 효과적이라고 볼 수 있다.

피로손상비를 70% 부여한 시편이 압축잔류응력 크기가 가장 많이 증가하였음에도 수명이 가장 낮은 이유는 부여한 피로로 인해 잔류응력이 낮아져 재료 내에서 크랙의 발생 및 전파가 용이하게 되어 재피닝을 실시했음에도 짧은 수명을 보이게 된 것으로 추정된다. 이에 대해서는 자세한 평가 및 관찰에 관한 추가 연구가 필요하다고 본다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 사용 전과 재피닝 가공 전후의 압축잔류응력 변화와 각 수명을 측정하고 반복하중을 받는 알루미늄 합금의 잔류응력 및 피로 수명의 변화를 평가하였으며 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) Al7075-T6의 재피닝 가공을 통하여 손상비 30%, 50%, 70% 중 어느 시점에 재피닝을 하여도 피로수명은 향상됨을 알 수 있었다.

(2) 압축잔류응력의 크기는 피로 손상이 가해짐에 따라 점차 감소함을 확인하였으며, 낮은 압축잔류응력의 크기는 재피닝을 통해 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

(3) 손상비 30%, 50%, 70% 에서 재피닝을 실시한 시편 중에서는 30% 에서 재피닝을 실시한 시편의 압축잔류응력이 가장 높고, 재피닝을 통해 압축잔류응력 회복량이 가장 높은 시편은 70%에서 재피닝을 실시한 시편으로 나타났다.

(4) 재피닝 시편 중에서 30%의 피로 손상을 가하고 재피닝을 실시한 시편의 피로 수명이 가장 높은 결과를 보였으며, 최대 87%의 수명 증대 효과가 있음을 확인하였다. 이는 재피닝으로 회복된 압축잔류응력의 영향으로 보인다.

#### 후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비(학과평가지원금)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Kobayashi, M., Matsui, T., 1998, Mechanism of Creation of Compressive Residual Stress by Shot Peening, *International Journal of Fatigue*, 20:5 351-357.
- [2] Webster, G. A., Ezeilo, A. N., 2001, Residual Stress Distributions and Their Influence on Fatigue Lifetimes, *International Journal of Fatigue*, 23:1 375-383.
- [3] Bergström J., Ericsson T., 1984, Relaxation of Shot Peening Induced Compressive Stress During Fatigue of Notched Steel Samples, *Proc. of the 2nd International Conference on Shot Peening*, 241-248.
- [4] Eckersley J. S., 1989, Shot Peening Plays a Vital Roll in rejuvenation of Aging Aircraft, *Shot Peening Theory and Application*, Institute for Industrial Technology Transfer International, 241-255 France.
- [5] Hammond, D. W., Meguid, S. A., 1990, Crack Propagation in the Presence of Shot-peening Residual Stress, *Engineering Fracture Mechanics*, 37:2 373-387.
- [6] ASTM International 2015, Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, ASTM E 466, USA.
- [7] Kim, T. H., Cheong, S. K., Shin, Y. S., 2002, A Study on the Fatigue of Al7075-T6 by Shot Peening, *Korea Society of Manufacturing Technology Engineers, Autumn Conference Proceedings*, 335-340.
- [8] Kim, J. C., Cheong, S. K., Noguchi, H., 2013, Evolution of Residual Stress Redistribution Associated with Localized Surface Microcracking in Shot-peened Medium-Carbon Steel During Fatigue Test, *International Journal of Fatigue*, 55 147-157.
- [9] Wi, J. H., 2008, A Study on the Improvement of Fatigue Characteristics of Al7075 alloy by Re-peening, A Thesis for a Master, Hanyang University, Republic of Korea.
- [10] Kang, J. S., 2002, Fatigue Characteristics of Re-peened SM45C Steel, *Korea Society of Mechanical Engineering, Spring Conference Proceedings*, 208-213.