

## 쇼트피닝 가공에 의한 Al 7075-T6의 피로특성에 관한 연구

### A Study on the Fatigue Characteristics of Al 7075-T6 by Shot Peening

김태형\*, 정성균\*\*, 신용승\*\*

Kim, Tae-hyung\* · Cheong, Seong-kyun\*\* · Shin, Yong-seung\*\*

\*서울산업대학교 대학원, 서울시 노원구 공릉2동 172 서울산업대학교 기계공학과  
\*\*서울산업대학교 기계공학과 서울시 노원구 공릉2동 172 서울산업대학교 기계공학과

#### Abstract

The shot peening process is most often used to improve fatigue properties of metal parts. In order to achieve optimum, repeatable and reliable fatigue enhancement from the shot peening process, the important shot peening parameters must be controlled.

In this paper, the optimum shot peening condition is investigated. Rotate bending fatigue test was accomplished to investigate the effects of shot peening on the fatigue strength. Experimental results show that the fatigue strength was tremendously increased by optimum peening condition. But the fatigue strength was decreased by under peening or over peening.

#### 1. 서 론

고강도 알루미늄 합금은 중량이 가벼우면서 인장강도 및 항복강도가 높고 내식성, 인성 등의 특성이 우수하기 때문에 일반기계의 구조물 및 선박, 자동차등 여러분야에 사용되고 있을 뿐만 아니라 항공우주산업분야에서도 많이 사용되고 있고 그 적용은 해가 갈수록 증가하고 있는 추세이다. 이에 걸맞게 기존의 부품에 대해서 효과적이고 손쉽게 원하는 성능과 수명을 유지하는 문제에 봉착하게 되었고 문제점을 해결하기 위해서 선진국에서는 항공부품 등의 취약한 부분에 쇼트피닝 가공을 거 치며, 이미 피로를 받은 부분에도 쇼트과정을 거쳐서 피로 수명을 증가시키

고 있다. 쇼트피닝 가공은 부품의 피로강도 및 피로수명의 향상에 있어서 중요한 역할을 하고 있으며, 설계 제작된 부품 및 구조물에서 발생할 수 있는 예기치 않은 파괴, 파손을 미연에 방지할 수 있는 특수가공 기술로 잘 알려져 있다.<sup>(1)</sup> 국내 항공우주산업분야에서도 쇼트피닝을 적용하고는 있지만 일반적으로 현장에서는 쇼트피닝 가공만 하면 부품의 특성이 좋아진다고 알고 있을 뿐 쇼트피닝 가공에 있어서의 최적 조건을 찾고 이에 대한 적용이 얼마나 중요한가를 아직 인식하고 있지 못하는 실정이다. 부품에 대한 균일성, 정확성, 신뢰성 있는 쇼트피닝 가공의 제어에 대한 여러 변수중 가장 중요한 점은 피닝강도(intensity)를 최적 상태로 유지하는 일이다. 쇼트피닝 가공에서 양질의 가공조건을 찾기 위한 쇼트피닝의 강도를 좌우하는 변수들에 관한 연구들이 많이 수행되어 왔으며 Aoki 등<sup>(2)</sup>은 쇼트피닝 조건을 서로 다르게 적용하여 피로강도의 효과를 연구하였다. 이 결과로 쇼트볼의 투사밀도를 높이거나 투사속도 및 쇼트볼의 경도를 증가시키면 피로강도가 증가함을 확인하였다. 또한 일부 몇몇 연구자들에 의해서는 피로손상을 받은 금속재료에 대한 재피닝 연구도 있었으며<sup>(3)</sup> 실제로 사용중인 항공기나 여러 기계부품에 쇼트피닝 가공하여 사용시간 누적에 따른 피로손상을 막고 수명을 연장시키기 위해 재피닝 가공을 적용하기도 하였다.<sup>(4)</sup>

본 논문에서는 항공우주 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 Al 7075-T6 소재에 대해서 피닝강도에 따른 수명변화를 통하여 최적의 피닝강

도를 찾고 쇼트피닝 가공에 따른 피로특성을 확인하고자 한다.

## 2. 쇼트피닝 가공이론

부품의 표면에 충격에너지를 전달하기 위해서 쇼트볼이라는 작은 강구를 고속으로 투사하여 표면의 요철 발생과 함께 얇은 소성변형층이 형성된다. 결국 탄소성층의 경계를 이루게 되고 이 소성변형층은 변형전의 상태로 되돌아가려는 반력이 작용하게 되어 표면에서는 압축잔류응력을, 그리고 내부에서는 인장응력을 갖고 평형을 이룬다. 이로서 반복되는 피로하중에 대해서 압축 잔류응력이 인장력에 의해 복원 될 때까지 피로 수명을 증가시키는 역할을 하게 된다. Fig. 1에 쇼트피닝 가공의 원리를 나타냈다.

쇼트피닝의 정도를 나타내는 알멘강도(Almen intensity)는 쇼트볼의 속도, 경도, 크기, 투사각, 무게 등에 따라 변하며 이 모든 것이 적절해야만 최적의 쇼트피닝 강도를 갖게 할 수 있다.<sup>(1,5)</sup> 이러한 강도의 측정은 아크하이트와 커버리지로 표시되며 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 피닝의 강도로 나타내게 된다. 아크하이트는 알멘스트립의 굽어진 정도로서 평가되고 이에 대한 규격은 SAE에서 규정하고 있다. 즉 투사된 쇼트볼에 의해서 충격을 받은 부위에서는 표면층이 늘어나려는 힘이 발생하고 충격을 받지 않은 반대면에서는 원래의 상태를 유지하려고 하기 때문에 결국 굽어지게 된다. Fig. 2에 알멘강도 측정 시스템을 표현하였다. 알멘강도를 측정하는 또 하나의 기준이 되는 커버리지는 투사된 쇼트볼이 표면을 타격한 밀도를 말하며 피닝 자국면적을 퍼센트로 나타낸다. 쇼트볼의 투사 노출 시간과 함수관계를 나타내며 아크하이트와 커버리지의 관계에서 노출 시간과의 산출식은 다음과 같다.<sup>(6)</sup>

$$C = 1 - (1 - C_1)^n$$

여기서,  $C$  ;  $n$ 회 통과 후 커버리지 (%)

$C_1$  ; 1회 통과 후 커버리지 (%)

$n$  ; 통과 횟수

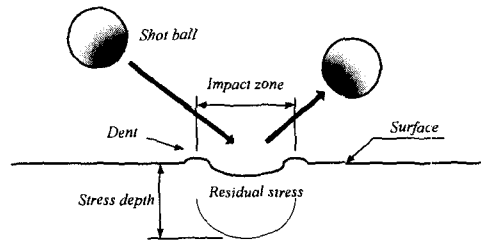


Fig. 1 Shot peening process

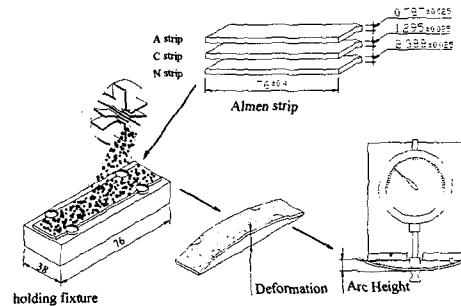


Fig. 2 The almen test strip system

## 3. 시험편 및 실험

본 연구에 사용된 시험편의 재료는 항공용 소재로 잘 알려진 Al 7075-T6 소재로서 재료의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같다. 또한 피로특성을 알아보기 회전굽힘 피로시험편을 제작하였으며 시험편의 최소직경을 8mm로 하였다. Fig. 3은 회전굽힘 피로시험편의 형상을 나타낸다.

사용된 쇼트볼은 경강선을 일정한 크기로 잘라서 만든 컷트와이어 쇼트볼을 사용하였다. 쇼트볼의 직경은 0.8mm이고 경도는 약 670Hv값을 가지며, 화학적 성분을 Table 3에 표시하였다.

쇼트피닝 장비는 임펠러 투사방식인 쇼트피닝 머신(Multi table type PTM-400)을 이용하였으며 투사시간을 4min으로 고정하고 쇼트볼의 투사속도를 14m/s에서 70m/s로 점차 증가시키면서 알멘스트립에 가공하여 아크하이트 변화를 측정하였다. 또한 피로특성을 알아보기 위해 피로 시험편의 양 단에 마스킹테이프를 감아 쇼트피닝에 의한 요철의 발생을 방지하였으며 시험편의 중앙부위를 쇼트피닝 가공하였다. Table 4에 쇼트피닝

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T6

(wt%)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti+Zr	Al
0.15	0.29	1.6	0.14	2.4	0.19	5.7	0.25	Remainder

Table 2 Properties of Al 7075-T6

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation(%)
Test result	578	635	9

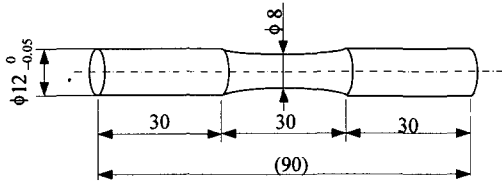


Fig. 3 Rotary bending fatigue testing specimen

가공조건을 나타냈으며 Fig. 4는 시험편에 쇼트피닝 가공하는 모습을 나타낸 것이다.

가장 우수한 피로수명 향상을 가지는 피닝강도 조건을 탐색하기 위해 적용 응력을 322MPa로 정하고 아크하이트의 변화에 따른 피로수명의 변화를 실험적으로 알아보았다. 이때 피로수명의 극대값을 갖는 피닝강도를 최적피닝강도라 결정하였고 이를 기준으로 하여 최적피닝강도에 미치지 못하는 언더피닝강도(under peening intensity)와 과도한 피닝강도를 갖는 오버피닝강도(over peening intensity)를 선택하였다. 선별된 세 종류의 피닝강도에 따른 시험편의 표면부 경도를 측정하기 위해 중앙부위를 다이아몬드 커터기로 절단하여 채취한 후 절단면을 연마하였으며 마이크로 비커스 경도계(MOK-E3)를 사용하여 시험편의 표면에서부터 깊이방향으로 0.4mm까지 0.02mm씩 측정하였다. 이때 압입하중은 25gf, 압입시간은 20초로 하였다. 또한 표면조도계(Mitutoyo SV-624)를 이용하여 중심선 평균거칠기(Ra), 최대 거칠기(Rmax), 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였다. 측정구간은 1.2mm로 하였고, 탐촉자의 속도는 1mm/s로 하였다.

Table 3 Chemical composition of cut wire shot ball

(wt%)

Composition	C	Si	Mn	P	S
SWRH 72A	0.69~0.76	0.15~0.35	0.30~0.60	Max. 0.030	Max. 0.030

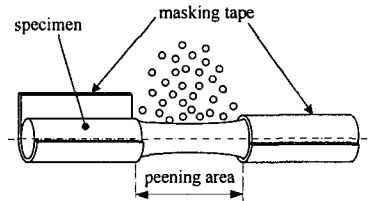


Fig. 4 Treatment of shot peening

Table 4 Conditions of shot peening

Content	Shot peening
Shot ball Dia.	0.8mm
Shot Velocity	14m/s ~ 70m/s
Time	4 min
Coverage	133%
Arc height (Almen A strip)	0.126mmA ~ 0.591mmA

선별된 아크하이트에 따른 피로특성을 알아보기 위해서 각각의 피닝강도별로 S-N선도를 구하고자 회전굽힘 피로시험을 실시하였다. 시험장비는 Ono식 피로시험기를 사용하였으며 응력비는 -1로 하였으며 회전수는 1800~2200rpm으로 하였다.

#### 4. 결과 및 고찰

쇼트볼의 투사속도에 따른 아크하이트의 변화를 알아보기 위해 알멘스트립에 쇼트피닝 가공한 후 알멘게이지로 측정된 결과 Fig. 5와 같은 결과를 얻었다. 쇼트볼의 투사속도가 증가할수록 아크하이트의 값도 증가하였다. 이는 쇼트볼이 지니고 있는 투사에너지가 알멘스트립의 표면에 전이되면서 투사속도가 빠를수록 에너지의 전이 또한 커지게 되기 때문이다.

피로수명의 극대값을 갖는 피닝강도의 최적조건을 실험적으로 탐색하기 위해 피닝강도에 따른 피로수명의 변화를 확인하였다. Fig. 6은 피닝강

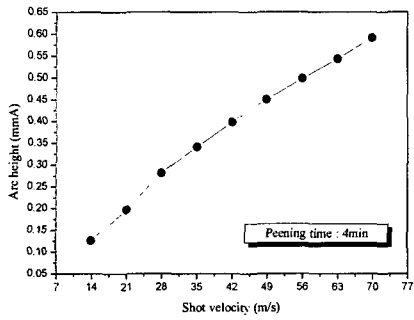


Fig. 5 Distribution of Arc height vs. shot velocity

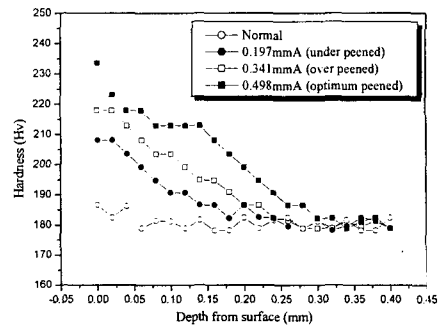


Fig. 7 The distribution of hardness

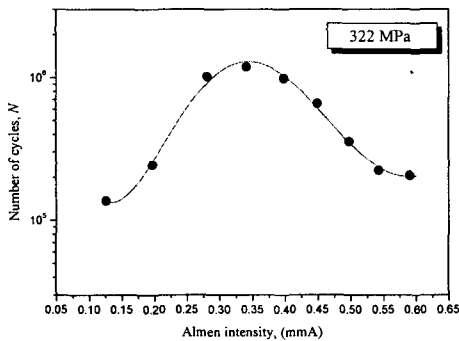


Fig. 6 Distribution of fatigue life by Almen intensity

도별 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. 결과로부터 피닝강도가 커질수록 초기에는 피로수명값이 증가하다가 아크하이트가 0.341mmA 일 때 최대 피로수명사이클을 얻었으며 0.341mmA를 벗어나기 시작하면서부터 수명이 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 이때 최대 피로수명을 갖는 피닝강도를 최적 피닝강도로 결정하였다. 최적의 피닝강도를 기준으로 하여 Fig. 7은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편과 최적피닝에 의한 아크하이트가 0.341mmA, 언더피닝에 의한 아크하이트가 0.197mmA, 그리고 오버피닝에 의한 아크하이트가 0.498mmA인 각각의 시험편에 대한 표면부의 경도를 측정된 결과이다. 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 경도값은 약 186Hv로 나타났고 언더피닝의 경우 약 208Hv, 최적피닝의 경우 약 217Hv, 오버피닝의 경우 약 233Hv값을 나타냈

Table 5 Roughness of Al 7075-T6 by peening intensity

	Peening intensity (mmA)			
	unpeened	under peening (0.197)	optimum peening (0.341)	over peening (0.498)
Rmax( $\mu\text{m}$ )	1.16	25.77	34.88	47.24
Ra( $\mu\text{m}$ )	0.13	4.27	6.595	9.68
Rz( $\mu\text{m}$ )	0.62	17.44	24.085	33.84

며 피닝강도가 증가할수록 표면부의 경도값도 각각 증가함을 알 수 있었다.

선별된 피닝강도에 따른 표면조도의 변화를 알 아본 결과 Table 5에서 보는바와 같이 피닝 강도가 커질수록 최대 표면거칠기(Rmax), 중심선 평균 거칠기(Ra), 10점 평균거칠기(Rz)값이 모두 커지고 있음을 알 수 있었다. 피로수명이 극대로 나타난 0.341mmA의 피닝강도를 갖는 시험편의 경우에 최대 거칠기(Rmax)는 34.88 $\mu\text{m}$ , 중심선 평균 거칠기값(Ra)는 6.595 $\mu\text{m}$ , 10점 평균거칠기(Rz)는 24.085 $\mu\text{m}$ 로 나타났다.

피로파괴는 표면부의 크랙의 발생과 진전에 의 해서 생긴다. 쇼트피닝 처리를 하면 이러한 피로 파괴의 지연을 돕는 역할을 할 수 있다는 선행연구를 기반으로 하여 회전굽힘 피로 시험을 수행 하여 Fig. 8, 10과 같은 결과를 얻었다.

Fig. 8은 언더피닝에 의한 0.197mmA의 피닝강도로 쇼트피닝 가공된 시험편과 오버피닝에 의한 0.498mmA의 피닝강도로 가공된 시험편, 최적피닝에 의한 0.341mmA의 피닝강도로 가공된 시험

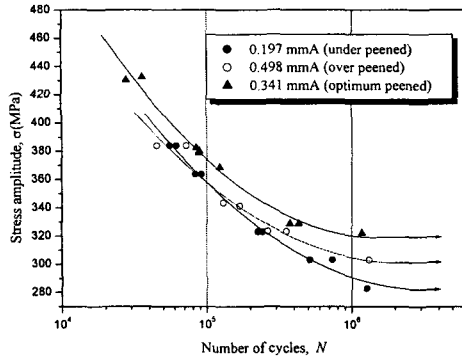


Fig. 8. S-N curve for shot peened specimens

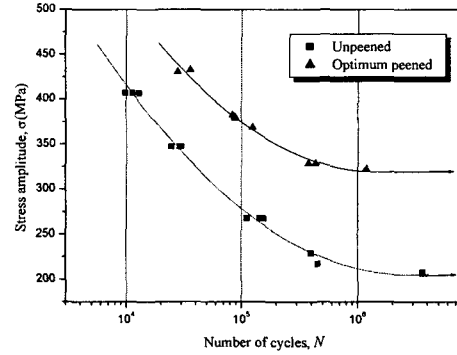


Fig. 10 S-N curve of unpeened specimen and optimum peened specimen

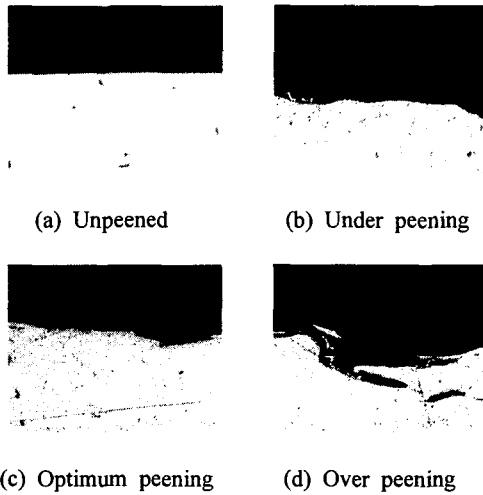


Fig. 9 Cross section of shot peening area fatigue test.

편에 대한 S-N 선도 결과를 나타낸 것이다. 결과로부터 피닝강도가 0.341mmA인 시험편의 경우 피로한도가 322.1MPa이고 피닝강도가 0.197mmA인 시험편은 282.7MPa, 피닝강도가 0.498mmA인 시험편은 302.9MPa로서 피닝강도 0.341mmA인 시험편이 0.197mmA인 시험편에 비해 피로한도는 13.9%, 피로수명은 약 386.5%의 증가를 나타냈다. 또한 피닝강도 0.498mmA인 시험편은 0.341mmA인 시험편에 비해 피로한도는 6.3% 감소하였고 피로수명은 233.9%가 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 경향은 언더피닝의 경우 재료에 미치는 압축잔류응력의 영향이 최적피닝보다 다소 부족

했기 때문에 사료되며 오버피닝의 경우에는 쇼트피닝 가공에 의한 과도한 소성변형으로 인하여 표면부의 심한 요철과 함께 미세한 균열이 발생하고 피로하중에 의한 균열의 성장속도가 더 큰 영향을 미치기 때문에 사료된다. 광학현미경을 이용하여 400배의 배율로 쇼트피닝 가공한 시험편의 단면을 측정된 결과를 Fig. 10에 나타냈다. 결과로부터 언더피닝의 경우에는 표면부에 요철이 거의 없는 양호한 상태를 나타낸 반면에 오버피닝의 경우에는 소성변형이 너무 크게 발생하여 표면부의 요철과 함께 미세한 균열 등이 나타났다.

Fig. 10은 최적피닝 조건으로 쇼트피닝 가공된 시험편과 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 대한 S-N선도를 나타낸 것으로 최적피닝 조건으로 가공된 시험편의 피로한도는 322MPa, 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편은 205MPa으로서 최적피닝 조건으로 쇼트피닝 가공된 시험편이 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 비해 피로한도는 57%가 증가하였으며 피로수명은 4,086%가 증가하였다.

## 5. 결론

피닝강도에 따른 피로수명 변화를 통하여 Al7075-T6의 최적 피닝강도 조건을 탐색하고 언더피닝과 오버피닝에 대한 피로특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로강도가 322MPa일 때 피닝강도별 피로수

명 변화를 확인한 결과 아크하이트가 0.341mmA 일 때 최대 수명을 나타냈다.

(2) 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 경도는 약 186Hv, 언더피닝 시험편의 경도는 약 208Hv, 최적 피닝은 약 217Hv, 오버피닝은 약 233Hv로 나타났고 표면에서 피닝강도가 증가할수록 표면부의 경도값도 증가하였다.

(3) 피닝강도가 0.341mmA인 시험편의 경우 피로한도가 322.1MPa, 0.197mmA인 시험편은 282.7MPa, 0.498mmA인 시험편은 302.9MPa로서 0.341mmA를 갖는 시험편이 0.197mmA인 시험편에 비해 피로한도는 13.9%, 피로수명은 386.5%의 증가를 나타냈고 피닝강도 0.498mmA인 시험편은 0.341mmA인 시험편에 비해 피로한도는 6.3%감소하였고 피로수명은 233.9%가 감소하였다.

(4) 최적피닝강도에 의해 쇼트피닝 가공된 시험편은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 비해 피로한도가 57%, 피로수명은 4,086% 증가하였다.

#### 참고문헌

(1) Cheong Seong-Kyun, Lee Seung-Ho, Chung Suk-Choo, 2001, "Effect of the Peening Intensity by Shot Peening," Transactions of the KSME A, Vol. 25, No. 10, pp. 1590~1596.

(2) Aoki, H., Nagashima, E., and Miura, T., 1990, "Effect of Shot Peening Conditions on Fatigue Strength of Carburized Steel", Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp.513~518.

(3) Bergstron, J., and 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, Chicago, pp. 241~248.

(4) John S. Eckersley, 1989, "Shot Peening Plays a Vital Roll in rejuvenation of Aging Aircraft," Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International, France, pp. 241~255.

(5) Al-Hassani, S.T.S., 1990, "Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening,"

Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening, Tokyo, pp.583~602.

(6) 김완두, 이선복, "쇼트피닝한 부재의 피로수명 예측 및 피로 강도 평가", 한국기계연구소 사보 제15편, pp75~87.