論文

Al7075-T6의 최적 쇼트피닝 조건에 관한 연구

정성균*, 김태형**

A Study on the Optimum Shot Peening Condition for Al7075-T6

Seong-kyun Cheong* and Tae-hyung Kim**

ABSTRACT

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

In this paper, the optimum peening intensity(Almen intensity) condition is investigated by experiment. Rotary bending fatigue test has been adopted to investigate the effects of optimum peening on the fatigue characteristics. Experimental results show that the fatigue strength and fatigue life has been tremendously increased by optimum-peening treatment. However, the fatigue strength and fatigue life has been decreased by under or over peening.

초 록

쇼트피닝 가공은 금속부품의 피로특성 향상을 위해 대부분 널리 이용되고 있는 방법이다. 쇼트피닝 가공에 있어 재현성이 있고 신뢰할 수 있는 최적화된 피로특성 증가를 위해 가장 중요한 점이 쇼트피닝 변수 조절이다.

본 논문에서는 최적 피닝강도(알멘강도) 조건에 대한 실험적인 연구가 수행되었다. 피로특성에 관한 최적피닝의 효과를 검토하기 위하여 회전굽힘피로시험법을 채택하였다. 실험 결과 피로강도와 피로수명이 최적피닝 조건에 의해 크게 증가하였으나 언더피닝 및 오버피닝의 경우에는 감소함을 보였다.

Key Words : Optimum peening(최적피닝), Almen intensity(알멘강도), Fatigue strength(피로강도), Fatigue life(피로수명), Rotary bending fatigue test(회전굽힘피로시험)

1. 서 론

고강도 알루미늄 합금은 중량이 가볍고 인장강도 및 항복강도가 높으며 내식성, 인성 등이 우수하여 항공우주 및 발전설비, 일반기계 구조물, 선박, 자동차 등 여러 산업분야에 사용되고 있으며 그 적용은 해가 갈수록 증가하고 있다.

부품의 내구성 및 신뢰성 문제를 해결하기 위한 방법 중의 하나로 쇼트피닝 가공기술이 널리 사용되고 있다. 선진국에서는 이미 SAE, MIL, GE, ISO 등 여러 표준화된 규격에 의해 항공부품의 취약한 부분에 쇼트피닝 가공을 하고 있으며, 이미 피로를 받은 부분에도 쇼트피닝 가공을 하여 피로 수명을 증가시키고 있다. 그러나 국내에서는 아직 KS규격이 제정되어 있지 않은 관계로 오래 전부터 쇼트피닝을 적용하고 있지만 가공만 하면 피로특성이 좋아진다고 알고 있을 뿐 최적피닝(optimum peening) 가공조건을 찾고자 하는 노력도 부족할 뿐만 아니라 이에 대한 중요

† 2003년 3월 4일 접수 ~ 2003년 6월 1일 심사완료

* 정희원, 서울산업대학교 기계공학과
연락처자, E-mail: skjung@snut.ac.kr
서울시 노원구 공릉동 172

** 정희원, 서울산업대학교 대학원

성을 인식하지 못하고 있는 실정이다. 이러한 이유로 산업현장의 무분별한 쇼트피닝 가공공정에 따른 피로특성의 불확실한 효과 및 오퍼피닝(over peening)에 의한 수명악화가 빈번히 발생하고 있다.

부품에 대한 균일성, 정확성, 신뢰성 있는 쇼트피닝 가공의 제어에 대한 여러 변수 중 가장 중요한 점은 피닝강도(intensity)를 최적 상태로 유지하는 일이다. Aoki 등[1]은 쇼트피닝 조건을 서로 다르게 적용하여 피로강도의 효과를 연구하였고 일부 몇몇 연구자들에 의한 피로손상을 받은 금속재료에 대한 재피닝 연구도 있었다[2]. Hilpert와 Wagner는 마그네슘 합금에 최적의 쇼트피닝 강도를 찾고자 하였으며[3] 알루미늄 합금과 이를 비교하는 연구도 수행되었다[4]. 또한 티타늄 합금의 최적 피닝강도 조건을 탐색하는 연구도 수행되었다[5].

본 연구에서는 항공우주 산업분야에서 가장 많이 사용되고 있는 AI7075-T6 소재에 대해서 피닝강도에 따른 수명변화를 통하여 최적의 피닝강도를 찾고 쇼트피닝 가공에 따른 피로특성을 확인하고자 한다.

II. 쇼트피닝 이론

일종의 냉간 가공방법으로 알려진 쇼트피닝 가공방법의 기본원리는 Fig. 1에 도시된 바와 같다. 금속부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이 고속 충돌할 때 쇼트볼의 운동에너지가 표면에 전이(transformation)되면서 표면부에 얇은 소성 변형층을 형성한다. 이때 표면 층에는 요철이 발생되며, 표면의 소성 변형 층을 경계로 하여 탄소성의 경계를 형성하게 된다. 이 소성 변형 층은 변형전 전의 상태로 유지하려는 반력이 작용하게 되어 표면에는 잔류압축응력, 내부에는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다.

쇼트볼 충돌에 의한 압축응력의 크기는 가공조건에 따라 차이는 있지만 일반적으로 표면에서

Fig. 1. Shot peening schematic.

Fig. 2. Almen test strip system.

깊이 0.15~0.25 mm 정도에 분포된다. 결국 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 피로수명이 연장된다[6].

쇼트피닝의 가공정도를 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[7]. 이러한 강도의 측정은 아크하이트와 커버리지로 표시되며 일반적으로 100 % 커버리지에서의 아크하이트를 피닝의 강도로 나타내게 된다. 아크하이트는 알멘스트립의 굽어진 정도로서 평가되고 SAE에서 규정하고 있다. Fig. 2에 알멘강도 측정 시스템을 표현하였다. 알멘강도를 측정하는 또 하나의 기준이 되는 커버리지는 투사된 쇼트볼이 표면을 타격한 밀도를 말하며 피닝자국면적을 백분율로 나타낸다. 투사된 노출시간과 커버리지 정도의 사이에는 함수관계가 성립되며 다음의 식(1)과 같이 표현된다[8,9].

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

여기서, C 는 n 회 노출된 커버리지(%), C_1 은 1회 노출된 커버리지(%), n 은 노출 횟수를 의미한다.

III. 실험

본 연구에 사용된 AI7075-T6의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1, 2에 나타내었다.

회전굽힘 피로시험편의 최소직경은 8mm로서, Fig. 3에 형상과 치수를 나타내었다.

금속부품 및 소재에 쇼트피닝 가공을 하기 위해서는 기본적으로 알멘강도를 선정해야 한다.

Table 1. Chemical composition of AI7075-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. Mechanical properties of Al7075-T6.

	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
Al7075-T6	578	635	9

Fig. 3. Rotary bending fatigue test specimen.

따라서 선정된 쇼트볼의 크기, 경도 및 재질에 따른 아크하이트-노출시간 선도로부터 SAE에 규정된 알멘스트립 A 형(Almen strip A type)에 투사시간을 4 분으로 고정하고 투사속도를 14 m/s부터 70 m/s로 점차 증가시키면서 아크하이트 값을 측정하였다. Table 3은 알멘스트립의 제원이다.

Table 3. Specification of Almen strip(A type).

Material	SAE 1070 (cold rolled spring steel)
Length	76±0.4 mm
Width	18.9~19.0 mm
Thickness	1.295 ± 0.025 mm
Hardness	HRC 44-50
Finish	blue temper, uniformly hardened, heat set between flat plates under pressure for a min. 2 hr. at 430±15℃

쇼트피닝 장비는 임펠러 투사방식인 쇼트피닝 머신(Multi table type PTM-400)을 이용하였으며, 피로 시험편 양단의 요철발생을 방지하기 위해 마스킹테이프를 감고 시험편의 중앙부위를 피닝 가공하였다. Table 4에 쇼트피닝 가공조건을 나타내었으며, Fig. 4는 쇼트피닝 가공하는 모습을 나타낸 것이다. 사용된 쇼트볼은 경강선을 일정한 크기로 잘라서 만든 컷와이어 구형 쇼트볼을 사용하였으며, 직경은 0.8 mm, 경도는 약 670 Hv이다. 화학적 성분은 Table 5와 같다.

적용하고자 하는 응력에 대한 가장 우수한 피로 수명을 갖는 피닝강도를 찾기 위해 알멘강도의 증가에 따른 피로수명의 변화를 실험적으로 확인하였다. 이때 피로수명의 극대값을 갖는 알멘강도를 최적피닝(optimum peening)이라 정하였고

Table 4. Shot peening conditions.

Content	Shot peening
Shot ball dia.	0.8 mm
Shot velocity	14 m/s ~ 70 m/s
Time	4 min
Coverage	200 %
Arc height (Almen A strip)	0.126 mmA ~ 0.591 mmA

Fig. 4. Shot peening treatment.

Table 5. Chemical composition of cut wire shot ball.

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

이를 기준으로 하여 최적 피닝강도에 미치지 못하는 알멘강도를 언더피닝(under peening), 최적 피닝강도를 넘어 피로수명이 감소되는 알멘강도를 오버피닝(over peening)이라 정하였으며, 각 시험편에 대한 피로특성 관계를 알아보기 위해 최적피닝은 피로수명의 극대를 갖는 알멘강도로, 언더피닝과 오버피닝은 각각 선정된 구간에서 임의의 알멘강도를 선정하여 쇼트피닝 가공한 시험편을 준비하여 회전굽힘 피로시험을 실시하였다. 시험장비는 Ono식 4절점 회전굽힘 피로시험기를 사용하였으며 응력비(Stress ratio, R)는 -1로 하였다.

가공된 세 종류의 시험편의 표면부로부터 깊이 별 경도를 측정하기 위해 중앙부위를 다이아몬드 커터기로 절단하여 채취한 후 절단면을 연마하였으며, 마이크로 비커스 경도계(MOK-E3)를 사용하여 시험편의 표면에서부터 깊이방향으로 0.4 mm까지 0.02 mm씩 측정하였다. 이때 압입하중은 25 gf, 압입시간은 20 초로 하였다.

같은 세 종류의 시험편에 대해서 표면조도 분포를 알아보기 위해서 표면조도계(Mitutoyo, SV-301)를 이용하여 최대거칠기(Rmax), 중심선

평균거칠기(Ra), 그리고 10점 평균 거칠기(Rz)를 측정하였다. 측정구간은 1.2 mm로 하였고, 탐촉자의 속도는 1 mm/s로 하였다.

IV. 결과 및 고찰

Fig. 5는 투사시간이 4 분일 때 쇼트볼의 투사 속도에 따른 아크하이트의 변화를 나타낸 결과이며, 투사속도가 증가할수록 아크하이트의 값도 증가하였다.

Fig. 5. Relation between arc height and shot ball velocity.

Fig. 6. Effect of Almen intensity on the fatigue life in rotary bending fatigue test.

Fig. 7. Hardness distributions of specimens.

Table 6. Roughness vs. Almen intensity.

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

Fig. 5의 결과를 기준으로 하여 피로수명의 극대를 갖는 피닝강도를 탐색한 결과 Fig. 6과 같이 피로강도 383.7 MPa일 때와 343.3 MPa일 때의 알멘강도에 따른 피로수명의 변화를 관찰하였다. 결과로부터 두 적용응력 모두 알멘강도가 커질수록 초기에는 피로수명이 점차 증가하다가 알멘강도가 0.341 mmA 일 때 최대를 나타냈고 0.341 mmA를 벗어나면서부터 오히려 수명이 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 결과로부터 최적 피닝강도는 0.341 mmA이다.

최적의 피닝강도를 기준으로 Fig. 7은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편과 최적피닝 시험편 (0.341 mmA), 언더피닝 시험편(0.197 mmA), 그리고 오버피닝 시험편(0.498 mmA) 각각에 대한 표면부의 깊이별 경도분포를 측정한 결과이다. 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 극표면부 경도 값은 약 186 Hv로 나타났고 언더피닝의 경우 약 208 Hv, 최적피닝의 경우 약 217 Hv, 오버피닝의 경우 약 233 Hv값을 나타냈다. 즉 피닝강도가 증가할수록 표면부의 경도값도 각각 증가함을 확인하였다. 이는 최적피닝에 의한 피로수명과는 관계가 없으며, 단지 쇼트볼의 투사에너지에 의한 피닝강도에 따라 표면부의 소성변형과 함께 동반되는 조직의 미세화가 원인으로 사료된다.

Table 6은 최적피닝 시험편, 언더피닝 시험편, 그리고 오버피닝 시험편에 대한 알멘강도별 표면 조도를 수치적으로 나타낸 결과이다. 표면조도는 최적피닝에 의한 피로수명에 큰 영향을 미치지 못 하였으며, 알멘강도의 증가에 따른 시험편 표면의 요철이 증가와 함께 강화요인인 소성변형이 크게 동반되기 때문으로 사료된다.

Fig. 8은 최적피닝 시험편, 언더피닝 시험편, 그리고 오버피닝 시험편에 대한 S-N선도 결과를 나타낸 것이다. 결과로부터 최적피닝 시험편의 피로한도는 322.1 MPa, 언더피닝 시험편은 282.7 MPa이고 오버피닝 시험편은 302.9 MPa로서 언더피닝 시험편은 최적피닝 시험편에 비해 피로한도 약 13.9 %, 피로수명 약 386.5 %가 미달된 피

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

Fig. 9. Cross-sections of shot peened specimens($\times 400$).

Fig. 10. S-N curves of unpeened and optimum peened specimens.

로특성을 보였다. 오버피닝 시험편은 오히려 최적피닝 시험편보다 피로한도 6.3 % 감소, 피로수명 233.9 %의 감소를 보였다. 이러한 경향은 언더피닝의 경우 재료에 미치는 압축잔류응력의 영향이 최적피닝보다 다소 부족했기 때문으로 사료

되며 오버피닝의 경우에는 과도한 소성변형으로 인한 표면부의 심한 손상과 함께 응력집중을 유발할 수 있는 균열의 발생 및 성장을 돕기 때문으로 사료된다. 하지만 오버피닝도 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 비해서 피로강도 및 피로수명은 모두 증가하였다. 이는 표면의 손상 및 균열에 대한 영향보다 압축잔류응력의 영향이 더 크게 좌우되기 때문으로 사료되며, 또한 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편 표면부의 스크래치 및 기계가공으로 인한 균일하게 배열된 조직이 서로 얹히고 깨뜨려지게 되어 균열의 성장이 다소 지연되도록 하기 때문으로 사료된다.

세 종류 시험편을 광학현미경을 사용해서 400배의 배율로 피닝단면을 측정된 결과를 Fig. 9에 나타냈다. 언더피닝의 경우에는 표면부에 요철이 거의 없는 양호한 상태를 나타낸 반면에 오버피닝의 경우에는 소성변형이 크게 발생하여 표면부의 요철과 함께 응력집중 발생을 유발시킬만한 손상이 뚜렷하게 나타났다.

Fig. 10은 최적피닝 시험편과 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 대한 S-N선도를 나타낸 결과이다. 결과로부터 최적피닝 시험편의 피로한도는 320 MPa, 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편은 205MPa로서 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 비해 약 57.6 %의 피로한도 증가를 보였다. 또한 피로강도 322 MPa를 기준으로 하였을 때 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 피로수명은 57,350 사이클, 최적피닝 시험편은 1,186,100 사이클로 피로수명은 약 1,960 % 증가하였다.

V. 결 론

알멘강도에 따른 피로수명 변화를 통하여 Al7075-T6의 최적 쇼트피닝 강도조건을 탐색하고 언더피닝과 오버피닝에 대한 피로특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 피로강도 383.7 MPa, 343.3 MPa를 기준으로 알멘강도에 따른 피로수명 변화를 관찰한 결과 모두 알멘강도가 0.341 mmA일 때 최대수명을 나타냈다.
- (2) 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편의 경도는 약 186 Hv, 언더피닝 시험편의 경도는 약 208 Hv, 최적피닝 시험편은 약 217 Hv, 오버피닝 시험편은 약 233 Hv로 알멘강도가 증가할수록 표면부의 경도값도 증가하였다.
- (3) 최적피닝(0.341 mmA) 시험편의 피로한도는 322.1 MPa, 언더피닝(0.197 mmA) 시험편의 피로한도는 282.7 MPa로 언더피닝 시험편은

최적피닝 시험편에 비해 피로한도 약 13.9 %, 피로수명 약 386.5 %가 미달되었고, 오버피닝 (0.498 mmA) 시험편은 피로한도가 302.9 MPa 로서 최적피닝 시험편에 비해 피로한도 6.3 %, 피로수명은 약 233.9 % 각각 감소하였다.

- (4) 최적피닝 시험편은 쇼트피닝 가공하지 않은 시험편에 비해 피로한도는 약 57.6 %, 피로수명은 약 1,960 %(322 MPa 적용응력 기준) 증가 하였다.

참고문헌

- 1) Aoki, H., Nagashima. E., and Miura. T., "Effect of Shot Peening Conditions on Fatigue Strength of Carburized Steel," The 4th ICSP, 1990, pp.513~518
- 2) Bergstron. J., and Ericsson. T., "Relaxation of Shot Peening Induced Compressive Stress During Fatigue of Notched Steel Samples," The 2nd ICSP, 1984, pp.241~248
- 3) Hilpert. M., and Wagner. L., "Effect of Mechanical Surface Treatments on The Fatigue Behavior of the High-Strength Magnesium Alloy AZ 80, Magnesium Alloys and Their Applications," DGM, 1998, pp.409~414
- 4) Dorr. T., Hilpert. M., Bechmerhagen. P., Kiefer. A., and Wagner. L., "Influence of Shot Peening on Fatigue Performance of High-Strength Aluminium and Magnesium Alloys," The 7th ICSP, 1999, pp.153-160
- 5) Drechsler. A., Kiese. J., and Wagner. L., "Effects of Shot Peening and Roller-burnishig on Fatigue Performance of Various Titanium Alloys," The 7th ICSP, 1999, pp.145~152
- 6) Iida. K., "Dent and Affected Layer Produced by Shot Peening," The 2nd ICSP, 1984, pp.283~292
- 7) Al-Hassani., S.T.S., "Mechanical Aspects of Residual Stress Development in Shot Peening," The 4th ICSP, 1990, pp.583~602
- 8) "SAE HAND BOOK PART 1 MATERIALS PARTS AND COMPONENTS," 1976, pp. 9.7~9.8
- 9) Eckersley, J. S., "Shot Peening Plays a Vital Roll in Rejuvenation of Aging Aircraft," Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International, 1991, pp.241~255