

가속수명시험법을 이용한 쇼트피닝가공 금속의 피로수명예측

강진식[†] · 남지현* · 이재현* · 정성균**

Fatigue Life Estimation of Shot Peened Metal Using Accelerated Life Testing

Jin-Shik Kang, Ji-Hun Nam, Jae-Heon Lee and Seong-Kyun Cheong

Key Words: Shot Peening(쇼트피닝), Accelerated Life Testing(가속수명시험), Fatigue Life(피로수명), Arrhenius Model(아레니우스 모델)

Abstract

Shot peening process is used as one of the various kinds of techniques to improve the fatigue properties. However, to obtain fatigue properties of metal materials, many efforts and time are needed. Because the fatigue life of shot peened metals increases highly. In this paper, fatigue properties of shot peened Al 7075-T6 are estimated using the fundamental of accelerated life test to reduce the experimental. Experimental results show that the estimated life data almost agree with actual rotary bending fatigue test data within 7% error.

1. 서 론

공업의 발달로 인한 오늘날의 금속재료는 과학 기술의 발달과 더불어 고강도화, 고정밀화, 경량화가 요구되고 있으며, 보다 특별한 조건 하에서 사용되어 지고 부품의 경량화가 요구되는 실정이다. 이러한 추세에 대처하기 위하여 기계부품의 성능 및 용도에 적합한 성질을 부여하면서 동시에 시간적, 경제적 비용을 최소화하여 피로강도를 증가시키는 방법으로 기존의 재료를 효과적으로, 그리고 손쉽게 원하는 성능과 수명을 유지하기 위해서 여러 가지 열처리 및 표면처리 방법이 제시되고 있으며, 이러한 표면처리 기술 중의 하나가 쇼트피닝 가공이다. 특히 쇼트피닝은 재료

의 강도를 증가시켜 설계능력을 높일 수 있을 뿐만 아니라, 재료의 중심부에서는 높은 인성을 유지할 수 있으므로 피로하중을 받는 기계구조물, 부품의 수명향상에 대단히 유용하다고 할 수 있다. 또한 쇼트피닝은 피로강도 및 피로수명 향상에 있어서 대단히 중요하다.^(1,2)

이러한 쇼트피닝된 재료나 부품의 피로특성을 파악하기 위해서는 일반적인 금속재료와 부품과 마찬가지로 피로시험을 수행하여 S-N 선도를 구하게 된다. 그러나 대부분의 부품 사용조건인 상온에서의 피로특성을 구하기 위해서는 상온에서 피로시험을 수행하게 되며 이러한 경우, 많은 노력과 긴 시간을 필요로 하게 된다.

이에 본 연구에서는 근래 국내에서 활발히 연구가 진행되고 있는 가속수명시험의 개념을 쇼트피닝된 재료에 적용하고자 한다. 상온에 비해 좀 더 빠른 시간에 파악된 고온피로특성 데이터들로부터 실제 상온조건에서의 피로특성을 구하기 위한 적절한 가속모델을 찾고, 이를 통하여 쇼트피닝된 재료 피로수명을 예측하여 실제 쇼트피닝된 부품에 적용가능성을 보고자 한다.

[†] 서울산업대학교 산업대학원

* 서울산업대학교 산업대학원

** 교신저자, 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : skjung@snu.ac.kr

TEL : (02)970-6330 FAX : (02)974-5008

2. 관련 이론

2.1 쇼트피닝 개념

쇼트피닝은 특수가공으로서 금속 부품의 표면에 쇼트볼(shot ball)이라는 강구를 고속으로 금속의 표면에 투사하여 금속의 표면을 햄머링(hammering)하는 일종의 냉간 가공이다. 쇼트피닝 가공은 쇼트볼이 금속 표면에 고속 충돌하면서 이때 쇼트볼의 운동에너지가 순간적으로 재료의 표면에 소성변형(plastic deformation)을 주고 표면에서 이탈한다. 쇼트볼과 충돌 후 표면층은 요철이 발생하며 표면에 얇은 소성 변형층을 형성하며 탄소성층의 경계를 형성하게 된다. 이 층은 늘어난 표면층을 늘어나기 전의 상태로 유지하려는 힘이 작용하게 되어 표면은 잔류압축응력, 내부는 인장응력을 갖고 평형을 이루게 된다.⁽³⁾ 쇼트볼이 충돌 후 압축응력이 잔류하게 되는데 응력의 크기는 크지만 응력은 가공조건에 따라 약간의 차이는 있으며, 일반적으로 표면에서 깊이 0.1~0.25mm 정도에 분포되고 특수한 경우 0.8mm 까지 분포 층을 형성시킬 수도 있다. 이러한 쇼트피닝 가공으로 재료의 표면에 압축잔류응력을 남게 함으로써 반복인장이 작용할 때 압축잔류응력은 점점 상쇄되어 압축잔류응력이 사라지게 될 때까지 피로수명 및 피로강도의 증가에도 크게 기여하고 있으며 이러한 쇼트피닝 가공은 사용 전에 하는 마지막 공정으로만 사용되는 것이 아니라 사용 중에 피로를 받는 부분에도 적용이 가능하다.

2.2 압축잔류응력과 온도와의 관계

쇼트피닝가공에 대해 선행된 많은 연구들에 따르면 쇼트피닝에 의해 재료에 발생된 압축잔류응력은 피로하중에 기인하여 감소되기도 하지만, 일반적으로 100℃ 이상의 고열에 노출시 압축잔류응력이 상당히 감소되는 것으로 나타났다.^(4,5)

Fig. 1은 쇼트피닝에 의해 압축잔류응력이 발생된 금속재료가 고온에 일정시간 노출시 온도에 따른 응력완화의 정도를 나타낸 것이고, Fig. 2는 일정온도에서 노출시간의 경과에 따른 응력완화의 정도를 나타낸 것이다. 두 그래프에서 보듯이 200~300℃ 사이에서 응력완화가 확연히 관찰되고, 노출 5시간 전후로 급격히 응력완화가 되는 것을 알 수 있다.

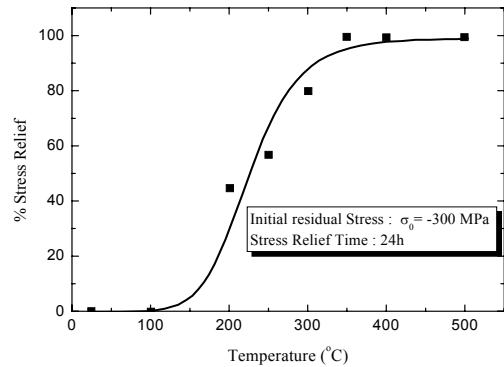


Fig. 1 Effect of temperature on the percentage stress relief of shot-peened material.⁽⁴⁾

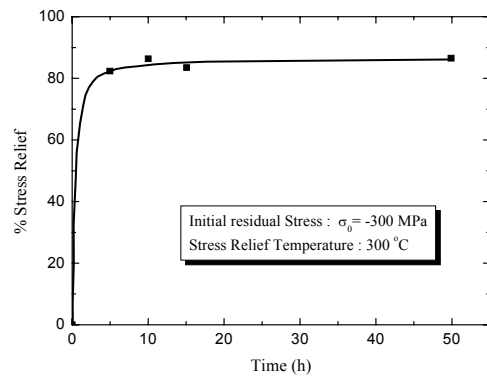


Fig. 2 Variation with time of the percentage residual stress relief.⁽⁴⁾

2.3 가속수명시험 모델

가속수명시험(Accelerated Life Test)은 사용조건보다 가혹한 스트레스수준에서 시험하여 고장발생을 가속시키고 가속조건에서 관측된 수명데이터들을 수명-스트레스 관계식을 이용하여 분석하여 사용조건에서의 수명을 추정하는 시험이다.⁽⁶⁾

가속조건과 사용조건의 관계를 나타내는 가속시험 모델 식에는 여러 가지 모델 식들이 있으나, 본 연구에서는 압축잔류응력과 온도와의 관계로부터 온도에 대한 가속수명식인 아레니우스 모델(Arrhenius Model)⁽⁶⁾을 사용하였다. 아레니우스 모델에 대한 수식은 다음과 같다.

$$t_f = A \exp(E_a/kT)$$

- t_f = failure time
- A = a constant
- E_a = activation energy
- k = Boltzman's constant(8.617×10^{-5} eV/K)
- T = reaction temperature, in K

아레니우스 모델 식에서 수명의 대수 값과 스트레인은 온도의 역수 $1/T$ 는 선형관계에 있으므로 여러 스트레일 수준에서 수명을 구하고 스트레일의 역수와 수명의 대수 값을 그래프로 나타내었을 때, 이 그래프가 직선이면 아레니우스 모델이 성립한다고 할 수 있다.

3. 실험 방법

3.1 시험편 및 재료

본 실험에 사용한 시험편 재료는 고강도 알루미늄 합금인 Al 7075-T6를 사용하였으며, 재료의 기계적 성질과 화학적 성분을 Table 1과 Table 2에 나타내었다. 피로시험편은 중앙부의 최소직경이 8mm가 되게 가공하였으며, 가공 후에 #2000 sand paper로 연마하고 다시 metal polish액으로 연마하였다. Fig. 3은 피로시험편의 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Mechanical properties of Al 7075-T6

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

Table 2 Chemical composition of Al 7075-T6 (wt%)

Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Ti+Zr	Cr	Zn
0.14	0.15	0.29	1.6	2.4	0.03	0.25	0.19	5.7
			1.65	2.5			0.2	5.8

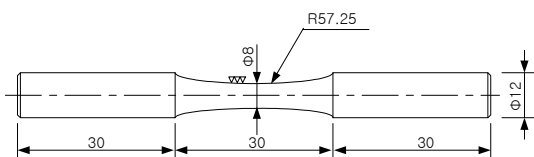


Fig. 3 Rotary bending fatigue test specimen

3.2 쇼트피닝 조건

가장 높은 피로수명을 갖는 피닝강도 조건을 찾기 위해 선행연구를 기초로 쇼트피닝기의 알멘 강도가 포화가 되는 투사시간을 4분으로 고정해 0.8mm 쇼트볼로 쇼트피닝 가공하였고 실험에 적용한 쇼트피닝 조건을 Table 3에 나타내었다. 실험을 통하여 아크하이트(Arc height)가 0.341 mmA 일 때를 최적조건으로 선정하였다.⁽⁷⁾

쇼트피닝기는 쇼트볼의 투사방식이 임펠러식인 쇼트피닝머신(MULTI TABLE TYPE, PTM-400)이며 쇼트볼은 경강선을 일정한 크기로 잘라서 구형화 작업을 통해 만들어진 커트와이어(cut wire) KS D 3559 SWRH 72A 라운드 볼을 사용하였다. 쇼트볼의 직경은 0.8mm이고 경도는 670Hv이다.

Table 3 Conditions of shot peening

Content	Condition
Shot ball diameter	∅ 8 mm
Impeller diameter	360 mm
Shot ball velocity	35 m/s
Time	4 min
Arc height (Almen A Strip)	0.341 mmA

3.3 피로시험

피로시험은 쇼트피닝 가공 후의 굽힘에 대한 피로수명의 변화를 관찰하기 위하여 회전굽힘 피로시험을 수행하였다. 본 시험에 사용된 피로시험기는 고온챔버를 장착시킨 Ono type 4절점 회전굽힘 피로시험기를 사용하였으며, 응력비(stress ratio, R)는 -1로 하였다. 체원은 Table 5에 표시하였다. Fig. 4는 고온 챔버를 장착했을 때의 회전굽힘 피로시험기의 일부를 나타낸 것이다. 모터와 고온챔버는 시험편이 파단되면 limit switch에 의해 자동정지되며 고온실험에 사용된 고온챔버 내의 온도조절은 고온챔버의 상부에 끼워져 있는 열전대(thermocouple)를 자동온도조절장치와 연결하여 원하는 온도를 유지하였으며, 온도제어범위는 0~900℃ 이다.

시험온도는 각각 온도가 다른 3조건(100℃, 150℃, 200℃)으로 선정하여 피로시험을 수행하였다. 또한, 온도 조건으로부터 예측된 결과를 검증하기 위하여 상온 조건에서 피로시험을 수행하였다.

Table 4 Characteristics of rotary bending fatigue testing machine

Content	Specification
Maximum bending moment	10 kgf-m
Testing speed	0~3400 rpm
Driving motor	3phases/200V/400W



Fig. 4 High temperature rotary bending fatigue test machine

4. 실험결과 및 고찰

4.1 쇼트피닝된 시험편의 피로특성

쇼트피닝 처리한 시험편의 피로특성을 알아보기 위해 S-N선도를 구하고자 회전굽힘 피로시험으로 피로강도를 평가하였다. Fig. 5는 각각 온도가 다른 3조건(100℃, 150℃, 200℃)에서 고온 피로시험을 실시하여 결과를 나타낸 것이다. S-N 선도는 log-log 좌표계로 직선 피팅을 하였다.

100℃에서 피로시험한 시험편 보다 150℃와 200℃에서 피로시험한 시험편이 피로강도 및 피로수명이 모두 감소하였다. 이는 고온으로 인하여 재료표면에 형성되었던 압축잔류응력이 열응력에 의하여 감소하고 연성이 증가하기 때문인 것으로 사료된다.

또한 상온에서도 피로시험을 실시하였는데 이는 가속수명모델을 이용하여 예측한 결과와 비교하기 위하여 시험을 실시하였다. 그 결과 피로한도는 1×10^7 사이클을 기준으로 272.8 MPa로서 100℃에서 피로시험한 시험편의 피로한도 236.4 MPa에 비해 약 15.4% 증가, 150℃에서 피로시험한 시험편의 피로한도 176.9 MPa에 비해 약 52.2% 증가, 200℃에서 피로시험한 시험편의 피로

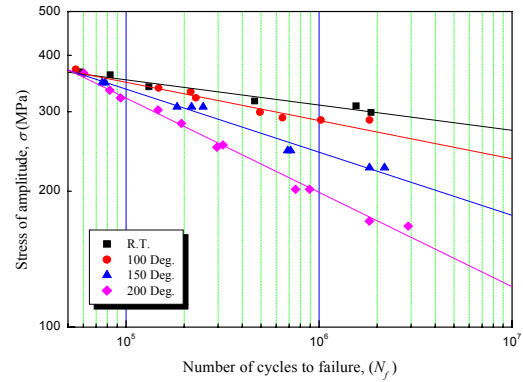


Fig. 5 S-N curves for high temperature shot peened

한도 122.6 MPa에 비해 약 122.5% 증가를 나타냈다. 그래프에서 보이듯이 1×10^5 사이클 이전에서 피로수명은 온도에 따른 수명차이가 크게 일어나지 않았다. 이는 시험편이 온도에 대한 노출시간이 짧아서 쇼트피닝에 의해 시험편 표면에 생성된 압축잔류응력의 완화가 충분히 이루어지지 않았기 때문으로 판단된다.

4.2 온도별 피로강도에 따른 피로특성 수명예측

앞서 시행한 온도별 피로시험의 결과로부터 온도에 대한 가속수명식인 아레니우스 식을 이용하여 각각의 온도별 응력범위를 선정하여 피로특성을 예측하여 보았다. 그 결과를 Fig. 6에 나타낸 바와 같이 5수준의 응력을 선정하였으며, 응력범위는 250 MPa에서 350 MPa까지 25 MPa씩 증가시켜 예측해 보았다.

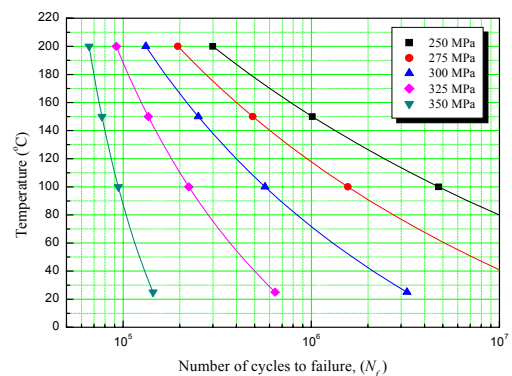


Fig. 6 Fatigue life estimate curve by temperature

그래프에서 보이듯이 온도가 증가할수록 피로 수명이 감소함을 알 수 있었다.

본 연구에서는 대부분의 금속재료 피로한도를 1×10^7 으로 규정하고 있기에 1×10^7 을 무한수명으로 설정하였다.

4.3 가속수명모델을 이용한 상온 피로특성 예측

고온 피로시험을 통하여 얻은 결과를 가지고 아레니우스 식에 적용하여 상온 피로특성을 예측하였다. 각각의 응력범위 5수준에서 구한 상온 예측수명을 Table 5에 나타내었다.

Table 5 R.T. fatigue life estimated

Stress	Estimated life(cycle)
250 MPa	127,337,813
275 MPa	18,640,972
300 MPa	3,225,804
325 MPa	642,427
350 MPa	144,202

응력범위를 250 MPa에서 350 MPa로 선정한 이유는 1×10^5 사이클 이전에서 3조건의 온도(100°C, 150°C, 200°C)와 상온에서의 피로특성 차이가 크지 않기 때문이다.

4.4 상온 피로특성 예측결과와 시험결과의 비교

Fig. 7은 아레니우스 식을 이용하여 예측한 S-N 선도와 실제 피로시험한 상온 데이터를 나타낸 것이다. 그림에서 보는바와 같이 예측된 수명 데이터와 실제 상온 데이터는 약간의 차이를 보이고 있다.

피로한도 1×10^7 사이클을 기준으로 실제 피로 시험한 시험편의 피로한도는 272.8 MPa이고 예측된 수명데이터의 피로한도는 283.6 MPa로서 약 4.0%의 오차를 가졌다.

또한 피로시험을 통하여 얻은 수명데이터와 예측된 수명데이터와의 오차를 비교하여 보았다.

1×10^7 사이클 피로한도를 기준으로 결과를 Table 6에 나타내었으며, 상온과 고온의 회전굽힘 피로시험 결과와 예측된 수명데이터를 Fig. 8에 나타내었다. 그 결과 상온 예측수명과는 약 4.0% 감소, 100°C 예측수명과는 약 0.8% 증가, 150°C 예측수명과는 4.7% 감소, 200°C 예측수명과는 6.9%

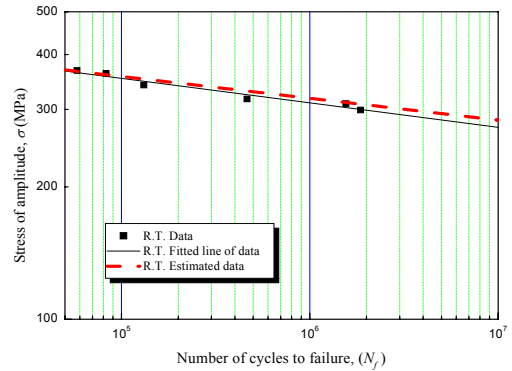


Fig. 7 comparison of fatigue test data and estimated data

Table 6 Error range of fatigue strength (at 1×10^7 cycle)

Content	Estimate (MPa)	Real (MPa)	Error
RT	283.6	272.8	- 4.0%
100°C	234.5	236.4	+ 0.8%
150°C	185.3	176.9	- 4.7%
200°C	114.7	122.6	+ 6.9%

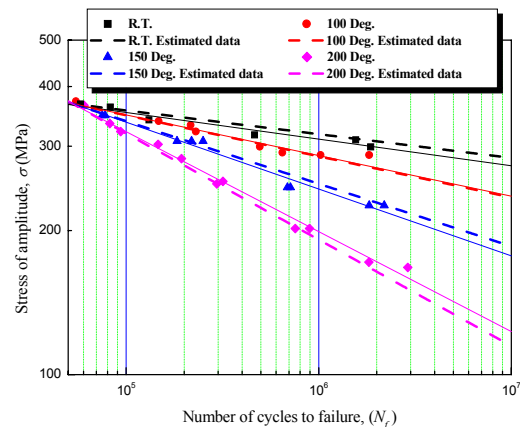


Fig. 8 comparison of estimated result and high temperature rotary bending fatigue test

증가를 보였으며, 전체적으로 약 7% 이내의 오차를 나타내었다. 또한, 그래프에서 보이듯이 상온 조건에서 피로한도는 272.8 MPa로 피로시험을 실시하여 1×10^7 사이클의 피로한도를 얻을 수 있었

고 100℃, 150℃, 200℃의 온도조건에서 같은 수준의 응력인 272.8 MPa로 시험시 피로수명이 100℃에서 약 1.83×10^6 사이클, 150℃에서 약 4.49×10^5 사이클, 200℃에서 약 2.19×10^5 사이클로 나타남을 알 수가 있다. 즉, 임의의 응력으로 고온조건(100℃, 150℃, 200℃)에서 피로시험을 실시함으로써 상온의 수명을 충분히 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

이상과 같이 아레니우스 모델이 쇼트피닝된 재료의 온도별 피로특성에 잘 적용되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실제 쇼트피닝 가공한 금속부품에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 논문에서는 가속수명시험의 개념을 쇼트피닝 처리한 시험편에 적용하여 상온에 비해 빠른 시간에 파악된 고온 피로특성 데이터로부터 상온 피로특성을 예측하고, 예측한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 고온 회전굽힘 피로시험 결과 온도가 증가할수록 피로특성이 감소하였다.

(2) 아레니우스 모델식을 이용하여 피로한도 1×10^7 사이클을 기준으로 예측된 상온 피로한도는 실제 상온 회전굽힘 피로시험한 시험편의 피로한도와 약 4.0%의 오차를 가졌다.

(3) 고온 3조건인 온도에서 예측된 수명데이터와 실제 피로시험한 수명데이터를 1×10^7 사이클 피로한도를 기준으로 비교하면 100℃ 예측수명과 약 0.8% 증가, 150℃ 예측수명과 4.7% 감소, 200℃ 예측수명과 6.9% 증가를 보였다.

(4) 가속수명모델식인 아레니우스식이 쇼트피닝된 재료의 온도-수명 관계에 잘 적용되는 것을 알 수 있었다.

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) Sharma, M. C., 1996, "Assesment of Over Peening by time on Fatigue behavior of Spring Steel," Proc. of 6th International Fatigue Congress, pp.1397~1402.
- (4) K.F. Amouzouvi, R.C. Styles, L.J. Clegg, D.P. McCooye and L.Zhao, A.K. Koul, 1996, "Effect of Heat Treatments on the Relief of Residual Stresses and Recrystallization Behavior of Shot-peened ZR-2.5NB Pressure Tube Material", ICSP-6, pp. 166~173.
- (5) Norihiko HASEGAWA, Yoshihiro WATANABE, "Effect of Shot Peening on fatigue Strength of Carbon Steel at Elevated Temperature", ICSP-5, pp. 157~162.
- (6) Lloyd W. Condra, 2001, "Reliability Improvement with Design of Experiments", MARCEL DEKKER, INC. pp. 229~235.
- (7) S. K. Cheong, T. H. Kim, 2003, "A Study on the Optimum Shot Peening Condition for Al7075-T6", Transactions of the KSAS, Vol. 31, No. 7, pp. 63~68.