

< 논문 >

가속수명시험을 이용한 쇼트피닝가공 알루미늄 합금의 신뢰성 평가에 관한 연구

남지현[†] · 강민우* · 정성균**

(2006년 4월 11일 접수, 2006년 9월 12일 심사완료)

A Study on the Reliability Evaluation of Shot Peened Aluminium Alloy Using Accelerated Life Test

Ji-Hun Nam, Min-Woo Kang and Seong-Kyun Cheong

Key Words : Accelerated Life Test(ALT; 가속수명시험), Shot Peening(쇼트피닝), Reliability Evaluation(신뢰성평가), Fatigue Characteristics(피로특성)

Abstract

In this paper, the concept of accelerated life test, which is a popular research field nowadays, is applied to the shot peened material. To predict the efficient and exact room temperature fatigue characteristics from the high temperature fatigue data, the adequate accelerated model is investigated. Ono type rotary bending fatigue tester and high temperature chamber were used for the experiment. Room temperature fatigue lives were predicted by applying accelerated models and doing reliability evaluation. Room temperature fatigue tests were accomplished to check the effectiveness of predicted data and the adequate accelerated life test models were presented by considering errors. Experimental result using Arrhenius model, fatigue limit obtain almost 5.45% of error, inverse power law has about 1.36% of error, so we found that inverse power law is applied well to temperature-life relative of shot peened material.

1. 서 론

최근 복합재료 등 신소재 개발과 더불어 부품의 신뢰성을 확보하기 위해 쇼트피닝 가공기술이 이용되고 있으며 실제로 피로를 받은 부분에 다시 쇼트피닝 가공을 하여 수명연장을 하는 재피닝(re-peening)에 관한 연구^(1,2)도 진행되어 왔다.

쇼트피닝 가공에 의한 피로수명 향상 요인은 쇼트볼이 재료의 표면을 타격할 때 발생하는 소성변

형에 의해 생성되는 압축잔류응력에 있다.⁽³⁾ 그러나 금속의 표면처리에 의한 피로수명 향상은 처리 조건이나 방법에 따라 결과가 복잡하게 나타나는 실정이고 부품에 대한 균일하고 신뢰성 있는 쇼트피닝 가공을 위해서는 피닝강도(peening intensity)를 최적의 상태로 유지해야 한다. Verport 와 Gerdes⁽⁴⁾는 실험결과 쇼트피닝 가공시 에너지가 높은 것만이 좋은 것이 아니라는 결론을 내렸고 몇몇 연구자들^(5,6)에 의해 알루미늄 합금에 대한 쇼트피닝의 효과에 관한 연구도 수행되었다. 또한, 재료의 온도조건이 고온 환경에서 작동되는 터빈 블레이드나 엔진부품 등은 피로하중과 열하중이 동시에 작용하게 되어 피로강도 및 피로수명을 현저하게 저하시켜 재료 내부의 응력풀립에 의한 강도의 저하를 고려해야 하지만 고온에서의 재료의 종류와 피로거동에 대한 자료가 불충분하고 연구가 필요한

[†] 책임저자, 회원, 서울산업대학교 산업대학원

* 일본 큐슈대학교 대학원 기계공학과

** 회원, 서울산업대학교 기계공학과

E-mail : skjung@snut.ac.kr

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

실정이다. 그러므로 쇼트피닝 실시에 따른 압축잔류응력의 분포형태 및 피로수명과의 관계를 명확히 하는 것은 기계구조물의 설계능력과 내구성 향상에 있어서 대단히 중요하다.

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 시간이 필요로 하게 된다.

이에 본 연구에서는 근래 국내에서 활발히 연구가 진행되고 있는 가속수명시험(Accelerated Life Test; ALT)의 개념을 쇼트피닝된 재료에 적용하고자 한다. 상온에 비해 고온에서 좀 더 빠른 시간에 파악된 고온 피로특성 데이터들로부터 실제 상온조건에서의 피로특성을 구하기 위한 적절한 가속모델을 찾고, 이를 통하여 최적 쇼트피닝 조건을 탐색하여 쇼트피닝된 재료의 피로수명을 예측하고 실제 쇼트피닝된 부품에 적용가능성을 보고자 한다. 이를 위해 쇼트피닝 가공효과를 평가하기 위해 일반적으로 항공용 소재로 쓰이고 있는 Al 7075-T6 소재를 선택하여 최적조건을 찾기 위해 회전굽힘 피로시험을 수행하였다. 회전굽힘 피로시험을 통해 얻어진 최적조건을 바탕으로 쇼트피닝 가공조건을 결정하고 각각 온도가 다른 3 조건(373 K, 423 K, 473 K)에서 고온 피로시험을 실시하여 변화를 고찰하였다. 또한 온도 조건으로부터 예측된 결과를 검증하기 위하여 상온 조건에서 회전굽힘 피로시험을 실시하여 예측한 상온 피로특성과 비교하였고 고온에서 가속성이 성립하는지 검증하였다.

2. 가속수명시험

2.1 가속수명시험 모델

가속수명시험(Accelerated Life Test; ALT)은 사용조건보다 가혹한 응력 수준에서 시험하여 고장발생을 가속시키고 가속조건에서 관측된 수명데이터를 수명-응력 관계식을 이용해서 분석함으로써 사용조건에서의 수명을 추정하는 시험이다.⁽⁷⁾

가속조건과 사용조건의 관계를 나타내는 가속시험 모델식에는 여러 가지 모델식들이 있으나, 본 연구에서는 압축잔류응력과 온도와의 관계로부터 온도에 대한 가속수명식인 아레니우스모형(Arrhenius model), 역거듭제곱모형(inverse power law)을 사용하였다.⁽⁷⁾

2.1.1 아레니우스모형

아레니우스모형은 제품의 수명이 온도에 영향을 받을 때 널리 사용되는 모형으로 온도에 따른 화학반응 비율을 나타내는 아레니우스 반응률 방정식(Arrhenius reaction rate equation)

$$t_f = A \cdot \exp(E_a / kT) \quad (1)$$

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

으로 유도된다. 제품의 고장시간은 반응량이 어떤 임계값에 도달한 시점과 동일하므로 제품의 고장시간을 t_f 라 하면 ‘ t_f = 임계값/반응률’로 나타낼 수 있으며, 이 모형을 아레니우스관계식이라 한다.

식 (1)의 아레니우스모형에서 명목수명 t_f 의 대수값과 응력인 온도의 역수 $1/T$ 은 선형관계에 있으므로 여러 응력 수준에서 명목수명을 구하고 응력의 역수와 명목수명의 대수값을 그래프로 나타내었을 때, 이 그래프가 직선이면 아레니우스모형이 성립한다고 할 수 있다.

2.1.2 역거듭제곱모형

역거듭제곱모형은 제품의 수명이 전압(전기 절연체), 하중(베어링), 물리적 부하나 열사이클링(급속재료) 등에 영향을 받을 때 널리 사용되는 모형으로 응력변수를 V 라 할 때, 명목수명 t_f 가 응력 V 와 역승의 관계가 있다고 보아

$$t_f = \frac{C}{V^n} \quad (2)$$

로 나타낸다. 식(2)의 대수형태는 $\log t_f = \log C - A \log V$ 로서 $\log t_f$ 와 $\log V$ 는 선형관계에 있다. 따라서 역거듭제곱모형의 타당성은 가로축과 세로축이 둘 다 대수척도로 되어 있는 로그로그-용지(log-log-paper)에 명목수명과 응력 수준을 타점하여 직선관계 여부를 파악할 수 있다.

2.2 온도에 따른 압축잔류응력

쇼트피닝가공에 대해 선행된 많은 연구들에 따르면 쇼트피닝에 의해 발생된 압축잔류응력은 피로하중에 기인하여 감소되기도 하지만, 일반적으로 100°C 이상의 고열에 노출시 압축잔류응력이 상당히 감소되는 것으로 나타났다.^(8,9)

Fig. 1 은 피닝에 의해 압축잔류응력이 발생된 금속재료⁽⁹⁾가 고온에 일정시간 노출시 온도에 따른 응력완화의 정도를 나타낸 것이고, Fig. 2 는 일정온도에서 노출시간의 경과에 따른 응력완화의 정도를 나타낸 것이다. 두 그래프에서 보이듯이 200 ~ 300°C 사이에서 응력완화가 확연히 관찰되고, 고온노출 5 시간 전후로 급격히 응력완화가 되는 것을 알 수 있다.

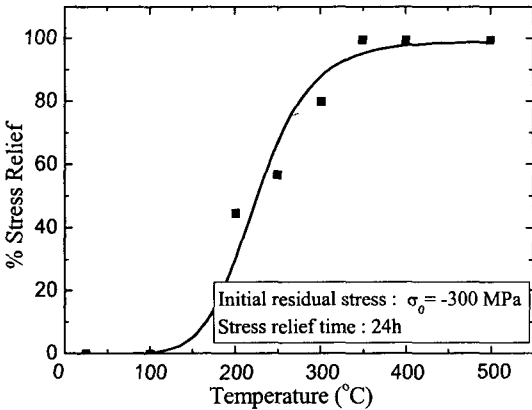


Fig. 1 Effect of temperature on the stress relief of shot-peened material⁽⁸⁾

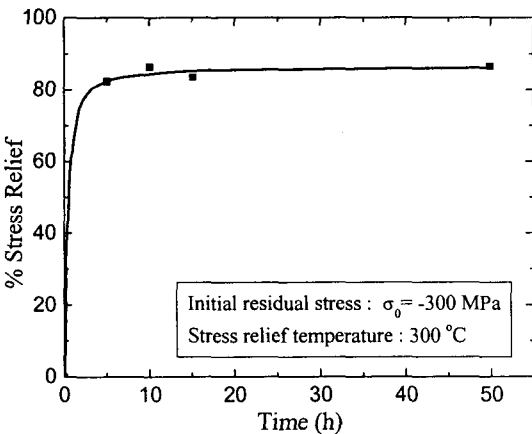


Fig. 2 Variation with time of the percentage residual stress relief⁽⁸⁾

3. 실험

3.1 시험편 및 재료

본 실험에 사용한 시험편 재료는 고강도 알루미늄 합금인 Al 7075-T6 를 사용하였으며, 재료의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 1 과 Table 2 에 나타내었다. 피로시험편은 중앙부의 최소직경이 8mm 가 되게 가공하였으며, 가공 후에 #2000 사포로 연마하고 다시 금속연마액으로 연마하였다. Fig. 3 은 피로시험편의 형상을 나타낸 것이다.

Table 1 Chemical composition of Al 7075-T6

(wt%)								
Mn	Si	Fe	Cu	Mg	Ti	Ti + Zr	Cr	Zn
0.14	0.15	0.29	1.60	2.4	0.03	0.25	0.19	5.7

Table 2 Mechanical properties of Al 7075-T6

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

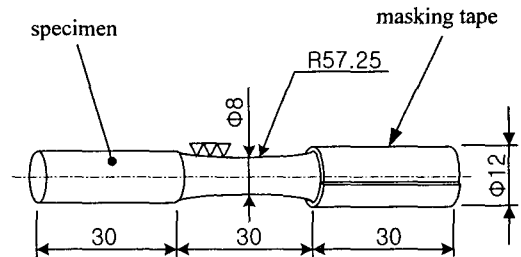


Fig. 3 Rotary bending fatigue test specimen

Table 3 Shot peening process conditions

Contents	Shot peening
Shot ball diameter	0.8 mm
Shot velocity	40 m/s
Time	6 min
Coverage	above 100%
Arc height (Almen A strip)	0.269 mmA

3.2 쇼트피닝 가공

쇼트피닝에는 임펠러 투사방식인 쇼트피닝 머신(PMI-0608)을 이용하였으며, 피로시험편 끝단의 요철발생을 방지하기 위하여 마스킹테이프를 감고 시험편의 중앙부위를 쇼트피닝 가공하였다. 쇼트볼은 컷 와이어 라운드 쇼트볼(cut wire rounded shot ball)을 사용하였으며, 쇼트볼의 직경은 0.8mm 이고 경도는 약 670 Hv 이다. Table 3 은 쇼트피닝 가공조건을 나타낸 것이다.

3.3 아크하이트-노출시간 선도

모든 피닝공정은 선택된 장비특성에 맞는 아크하이트-노출시간 선도 즉, 포화선도가 요구된다. 이 선도로부터 공정자는 원하는 알멘강도로 투사시간, 투사량 및 투사속도 등을 정확하게 결정할 수 있으며 신뢰할 수 있는 피닝강도를 얻을 수 있다. 이러한 최적 피닝강도는 아크하이트와 커버리지로 표시되며 일반적으로 100% 커버리지에서의 아크하이트를 기준으로 하며, SAE 규정에 의거하여 알멘스트립 A 형(Almen strip A type)에 투사속도 40 ~ 70m/s, 투사시간은 30 초에서 16 분까지 변화시켜가며 아크하이트를 측정하였다. 피닝 후 각각 5 개씩 굽어진 만곡의 높이를 알멘게이지로 측정하여 평균 정리하였다.

3.4 최적 쇼트피닝 조건

가장 높은 피로수명을 가지는 피닝강도 조건을 찾기 위해 선행연구를 기초로 아크하이트-노출시간에 따른 피로수명의 변화를 관찰하였다. 최적조건 탐색조건은 투사시간을 6 분으로 고정하고 투사속도를 30m/s 에서 60m/s 까지 변화시켜 가면서 적용응력이 307MPa 을 기준으로 피로 파단수명을 측정하였다. 이때 피로수명의 극대값을 갖는 알멘강도를 최적피닝(optimum peening)이라 정하였다.

3.5 커버리지 탐색

최적의 피닝강도를 선정하기 위해 요구되는 중요인자인 100% 커버리지를 탐색하였다. 우선 알멘스트립의 한쪽 면을 거울 면과 같이 연마하여 쇼트피닝을 실시하였다. 알멘스트립의 피닝가공에 의한 압흔의 밀집도를 광학현미경 40 배율의 이미지로 분석하여 100% 커버리를 탐색하였다.

3.6 가속수명평가시험

고온 피로시험은 쇼트피닝 가공 후 AI 시험편의 굽힘에 대한 피로수명의 변화를 관찰하기 위하여 회전굽힘 피로시험을 수행하였다. 본 시험에 사용된 피로시험기는 고온챔버를 장착시킨 회전굽힘 피로시험기(SHIMADZU, H7)를 사용하였다. 고온챔버의 온도제어범위는 0 ~ 900℃이다.

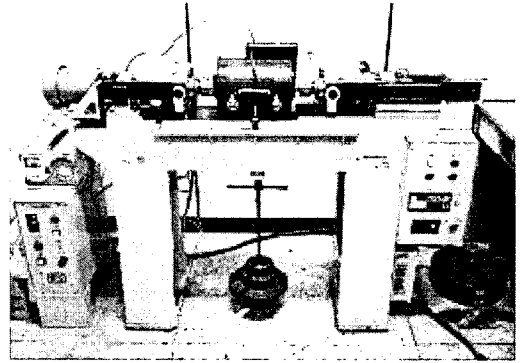


Fig. 4 Rotary bending fatigue testing machine

시험온도는 각각 온도가 다른 3 조건(373 K, 423 K, 473 K)으로 선정하여 피로시험을 수행하였으며, 모터의 회전수는 피로시험기에 무리가 가지 않는 범위인 1800 ~ 2200 rpm 을 유지하면서 실험하였다. 하중은 파단강도를 증가시키면서 실시하였으며, 고온챔버내의 초기 온도제어는 PID(Proportional Integral Derivative) 제어방식으로 정해진 온도에서 하중을 가하면서 실험하였다. 또한, 온도 조건으로부터 예측된 결과를 검증하기 위하여 상온 조건에서 피로시험을 수행하였다. Fig. 4 는 고온챔버를 장착했을 때의 회전굽힘 피로시험기를 나타내었고 시험편에 가해지는 응력은 순수 굽힘응력 상태이며, 굽힘응력은 식 (3)과 같이 정의된다.

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

여기서 σ_b : 굽힘응력
 M : 굽힘모멘트
 I : 관성모멘트
 P : 적용하중
 L : 모멘트 거리
 d : 시험편 직경

4. 실험결과 및 고찰

4.1 포화선도 및 커버리지 측정

Fig. 5 는 포화선도(saturation curve)로서 쇼트피닝 가공공정의 기준이 되는 기초자료로 이용된다. 투사속도를 40m/s ~ 70m/s 까지, 투사시간을 30 초에서 16 분까지 변화시켜가며 아크하이트를 측정한 결과 약 4 분정도까지는 급격한 증가를 보이다가

서서히 소량증가를 보였으며, 최소 0.078 mmA 로부터 최대 0.528 mmA 의 다양한 아크하이트를 얻었다.

포화선도로부터 투사속도 70m/s 와 50m/s 의 두 조건에 대해서 100% 커버리지를 탐색하였다. Fig. 6 은 광학현미경 40 배율로 측정된 알멘스트립의 커버리지 이미지를 비교한 것이다. 70m/s 의 경우 180 초에서 120%의 커버리지가 관찰되어 약 140 초에서 100%의 커버리지를 유추할 수 있었으며, 50m/s 의 경우 180 초에서 약 100%의 커버리지를 얻었다. 실제 산업현장에서는 100% 이상의 커버리지를 요구하고 있으며, 100%의 커버리지 시간을 2 배로 하게 되면 200%, 3 배의 경우 300%의 얻을 수 있다.

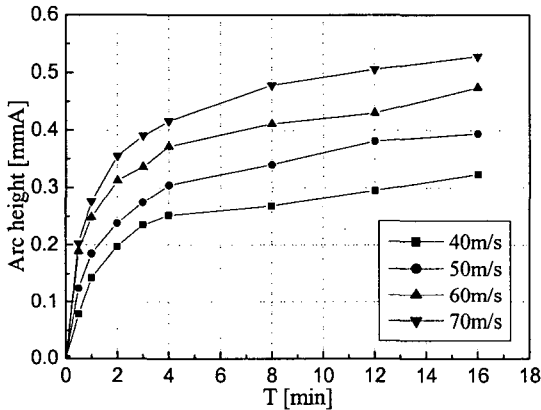
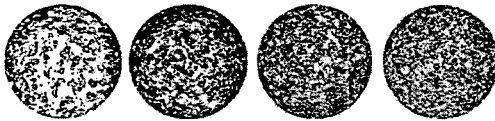


Fig. 5 Relation between arc height and exposure time



30sec (40%) 60sec (60%) 120sec (90%) 180sec (120%)

(a) 70 m/s condition



30sec (30%) 60sec (50%) 120sec (85%) 180sec (98%)

(b) 50 m/s condition

Fig. 6 Comparison of coverage

4.2 최적 쇼트피닝 조건탐색

가장 우수한 피로수명을 가지는 피닝강도를 탐색하기 위해 쇼트볼의 투사속도에 따른 피로수명의 변화를 확인하였다. Fig. 7 은 투사시간을 6분으로 고정하고 투사속도를 변화시켜 가면서 적용응력 307MPa 을 기준으로 피로 파단수명을 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 결과로부터 투사속도가 증가할수록 초기에는 피로수명이 증가하다가 투사속도 40m/s 일 때 최대의 피로수명을 가졌으며, 그 후 40m/s 를 벗어나면서 피로수명이 점차 감소하는 경향을 나타냈다. 따라서 최적의 피로수명을 가지는 투사속도를 선정할 수 있었으며 이를 피로 시험으로부터 확인하였다.

4.3 가속인자의 시험수준결정

Fig. 8 은 온도에 따른 쇼트피닝된 시험편의 피로수명의 변화를 나타낸 것이다. 온도가 증가할수록 일정한 간격으로 피로수명이 감소하였다. 이러한 결과로 보아 재료표면의 압축잔류응력은 온도가 증가할수록 감소하여 피로수명이 감소되는 것을 확인하였다.

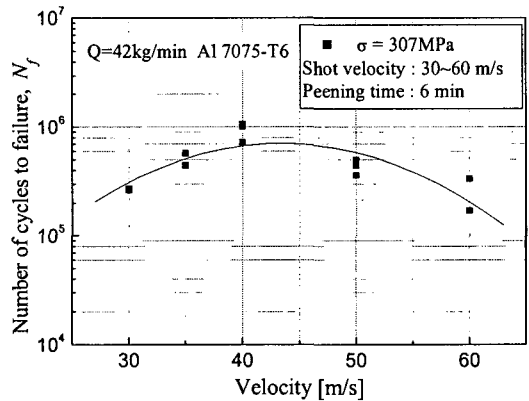


Fig. 7 Effect of shot velocity on the fatigue life

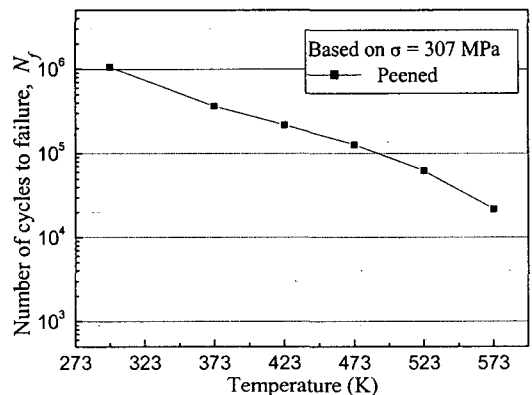


Fig. 8 Temperature level for accelerated life test

Fig. 9 는 각 온도별 1 시간 동안 전기로에 시험편을 보관한 후 꺼내어 측정한 표면경도 값을 나타낸 것이다. 373 K 이하 에서는 표면경도의 변화는 없었으며 423 K 에서 573 K 사이에서 급격하게 표면경도가 저하되었고 573 K 이후부터는 표면경도가 수렴하였다.

Fig. 10 은 523 K 에서 시간에 따른 표면경도의 변화를 나타낸 것이다. 설정한 시간은 30 분에서 24 시간까지 설정하였으며 초기 2 시간까지는 급격하게 표면경도가 감소하다가 그 이후시간부터는 경도가 수렴하였다. 이러한 결과로 볼 때 재료가 고온에 노출시 재료 내부의 응력이 상당히 감소되었으며, 약 523 K 이전의 온도에서 약 1 시간까지는 쇼트피닝에 의한 재료표면의 압축잔류응력이 존재하였다. 이러한 결과로부터 온도 적용범위는 열 가속인자 수준에 맞게 373 K ~ 473 K 사이에서 3 수준을 정하였다.

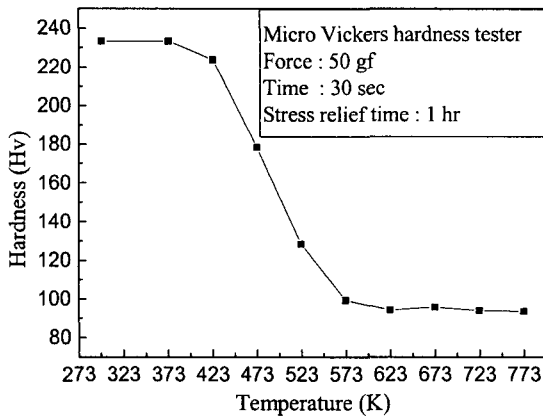


Fig. 9 Effect of temperature on the hardness relief for 1 hour

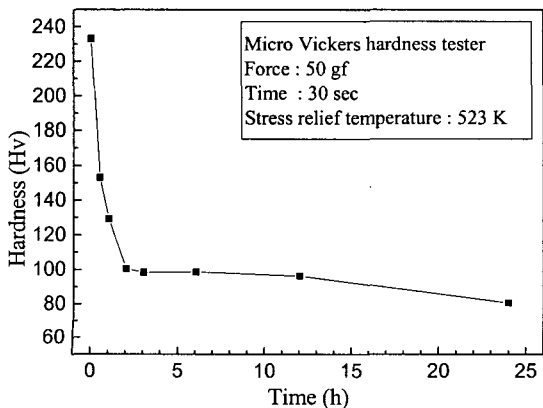


Fig. 10 Variation with time of the hardness relief at 523 K

4.4 쇼트피닝가공 시험편의 고온피로특성

쇼트피닝 처리한 시험편의 피로특성을 알아보기 위해 S-N 선도를 구하고자 회전굽힘 피로시험으로 피로강도를 평가하였다. Fig. 11 은 각각 온도가 다른 3 조건(373 K, 423 K, 473 K)에서 고온 피로시험을 실시하여 얻은 결과를 나타낸 것이다. S-N 선도는 log-log 좌표계로 직선 피팅을 하였다.

각각의 S-N 선도에서 피로시험편은 5 개씩 실험하여 평균 정리하였으며 결과로부터 373 K 에서 피로시험한 시험편 보다 423 K 와 473 K 에서 피로 시험한 시험편이 피로강도 및 피로수명이 모두 감소하였다. 또한 1×10^5 cycles 이전, 후에서 피로수명은 온도에 따른 수명차이가 크게 일어나지 않았다. 이는 시험편에 가해지는 응력이 크고 반복 피로하중에 의한 표면압축잔류응력의 완화영향이 크기 때문이라고 판단된다.

4.5 가속수명시험 모델선정

고온에서의 가속성이 성립하는지를 판별하기 위하여 적용응력 307MPa 에서 시험한 3 개의 온도조건 피로특성 데이터를 기초로 판별하였다. 수명-응력 사이의 관계에서 일반적인 가속수명시험의 모델로 온도에 대한 하나의 응력 인자만 고려하여 아레니우스모형과 역거듭제곱모형 관계식을 이용하여 가속수명 모델을 평가하였다.

참고로 가속수명시험의 모델을 결정하고 신뢰도를 계산하기 위해서는 반드시 실사용 조건이 명시되어야 한다. 실사용 온도는 보통의 사용온도인 298 K (25°C)로 정하였다.

Fig. 12 는 수명에 대한 파손확률(probability of failure or unreliability)을 와이블분포용 확률지에 나타낸 것이다. 그림에서 좌측 3 개의 실선은 각각 3 조건의 고온 시험조건에서 얻어진 시험자료로부터 최우추정법(maximum likelihood method)을 이용하여

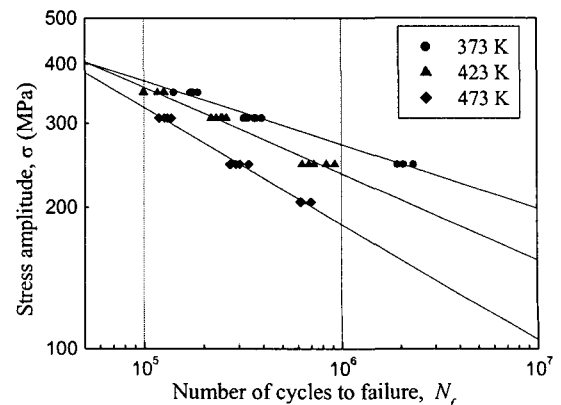


Fig. 11 S-N curves for shot peened specimens

얻어진 회귀직선이며, 우측의 점선은 실제 사용조건에서 얻어진 것이다. 또한, 3 개의 직선은 동일한 기울기인 형상모수를 가지며, 이는 가속수명시험 기법의 기본가정(i.e: common shape parameter)에 의한 것이다. 이로부터 가속수명시험모델은 Fig. 12의 수명데이터로부터 최우추정법을 이용하여 결정하였으며, Fig. 13은 수명과 응력 사이의 분포를 나타낸 것으로 각각의 온도에 대한 수명의 분포가 잘 묘사되어 있다.

4.6 온도별 피로강도에 따른 피로특성 수명예측 앞서 시행한 온도별 피로시험의 결과로부터 온도에 대한 가속수명식인 아레니우스모형과 역거듭제곱모형 관계식을 이용하여 각각의 온도별 응력범위를 선정하여 피로특성을 예측하여 보았다. 그 결과를 Fig. 14에 나타냈으며 응력범위는 250MPa에서 400MPa까지 25MPa씩 증가시켜 가면서 예측하여 보았다. 그래프에서 보이듯이 온도가 증가할수록 피로수명이 감소함을 알 수 있었다. 또한 온도가 다른 3 조건(373 K, 423 K, 473 K)에서 두 모델의 피로수명은 일치하고 있으며 상온조건에서는 피로수명의 차이를 보이고 있으나 위에서 예측한 결과와 잘 일치함을 알 수 있었다.

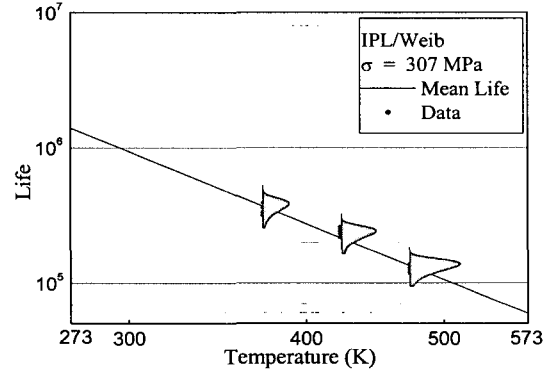
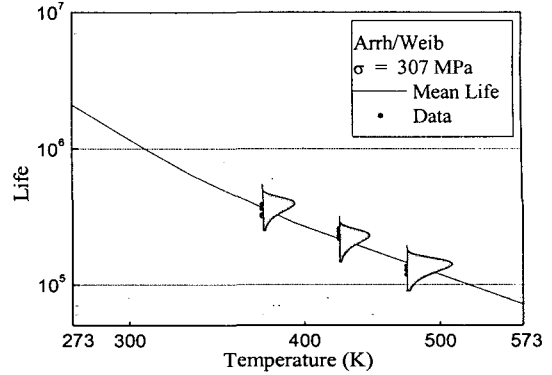


Fig. 13 Life vs. temperature plot

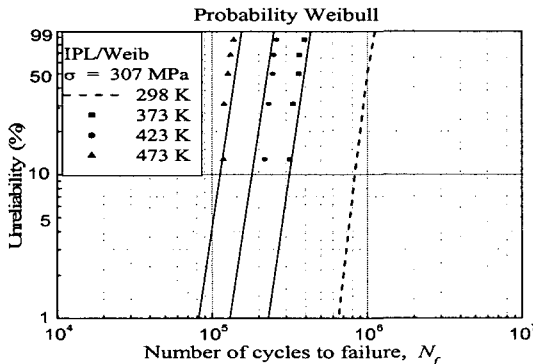
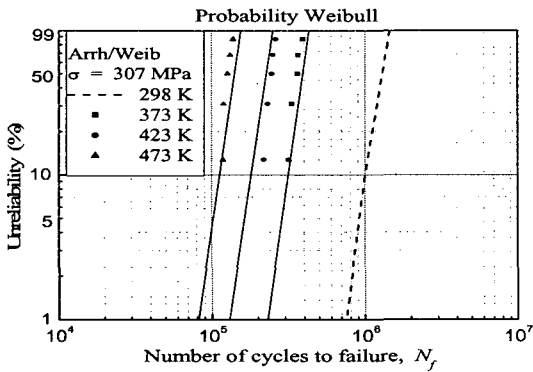


Fig. 12 Probability Weibull plot for three temperature level

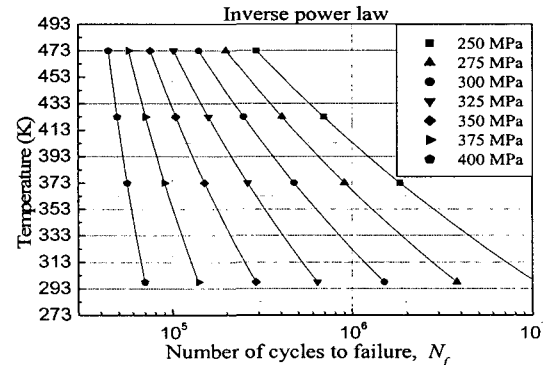
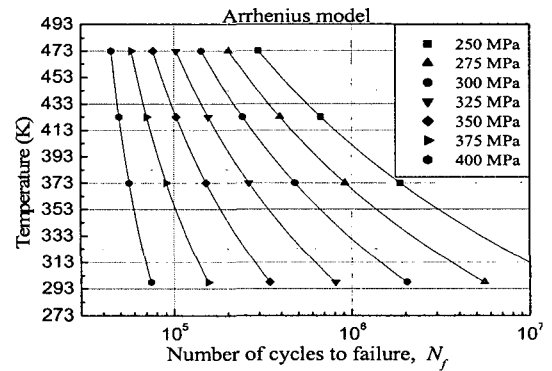


Fig. 14 Fatigue life estimate curve by temperature

4.7 상온 피로특성 예측비교

고온 피로시험을 통하여 얻은 결과를 가지고 아레니우스모형과 역거듭제곱모형 관계식을 이용하여 상온 피로특성을 예측하였다. 또한 상온조건에서도 피로시험을 실시하였는데 이는 가속수명모형을 이용하여 예측한 결과와 비교하기 위하여 시험을 실시하였다.

각각의 응력범위를 250MPa 에서 400MPa 로 선정 한 이유는 실제 피로시험시 1×10^5 cycles 이 전에서 3 조건의 온도(373 K, 423 K, 473 K)와 상온조건에서의 피로특성 차이가 크지 않기 때문에 실험 결과와 비교하기 위하여 응력범위를 선정하였다.

Fig. 15 와 Fig. 16 은 예측한 상온 S-N 선도를 점선으로 나타내었으며 실제 피로시험한 상온 데이터를 실선으로 나타내고 이를 비교한 것이다. 피로한도 1×10^7 cycles 을 기준으로 실제 피로시험한 시험편의 피로한도는 247.8MPa 이고 예측된 아레니우스모형의 피로한도는 261.3MPa 로서 약 5.45%의 오차를 가지며, 예측된 역거듭제곱모형의 피로한도는 251.1MPa 로서 약 1.36%의 오차를 가진다.

4.8 고온 가속수명평가시험 예측결과 비교

고온 회전굽힘 피로시험을 통하여 얻은 수명데이터와 예측된 수명데이터와의 오차를 비교하여 보았다.

1×10^7 cycles 피로한도를 기준으로 예측된 아레니우스모형과 고온 피로시험 결과를 Table 4 에 나타내었으며, 상온과 고온의 회전굽힘 피로시험 결과와 예측된 데이터를 Fig. 15 에 S-N 선도로 나타내었다. 점선은 Arrhenius 관계식을 이용하여 예측한 결과이고 실선은 실제 피로시험한 S-N 선도를 나타낸 것이다.

상온조건에서 피로한도는 247.8MPa, 373 K 에서는 199MPa 로 상온 최적피닝 시험편에 비해 약 19.7% 감소하였고, 423 K 에서는 155.1MPa 로서 약 37.4% 감소, 473 K 에서는 104.7MPa 로서 약 57.7% 감소하였다. 상온 쇼트피닝 가공에 의한 시험편 모두 온도가 증가 할수록 피로특성이 감소하였는데 이는 고온으로 인한 재료표면의 압축잔류응력이 열응력에 의해 감소하고 연성이 증가하기 때문으로 사료된다.⁽¹⁰⁾

Table 4 Comparison of experimental and calculated results of Arrhenius model at 1×10^7 cycles

Temp.	Experimental result (MPa)	Calculated result by Arrhenius model (MPa)	Error (%)
R. T.	247.77	261.26	+ 5.45
373 K	199.00	199.70	+ 0.35
423 K	155.14	153.73	- 0.90
473 K	104.69	105.21	+ 0.50

Table 5 Comparison of experimental and calculated result of inverse power law at 1×10^7 cycles

Temp.	Experimental result (MPa)	Calculated result by inverse power law (MPa)	Error (%)
R. T.	247.77	251.13	+ 1.36
373 K	199.00	199.09	+ 0.05
423 K	155.14	155.63	+ 0.32
473 K	104.69	103.90	- 0.75

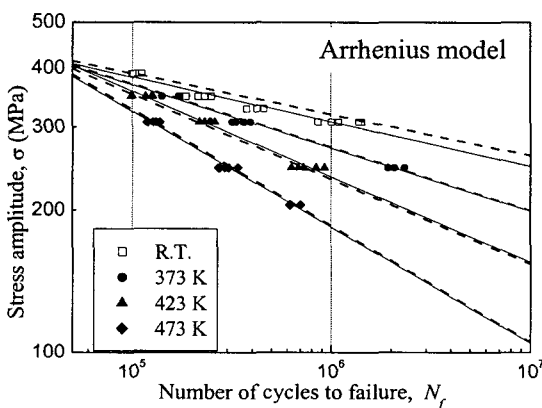


Fig. 15 Comparison between Arrhenius model data and experimental data

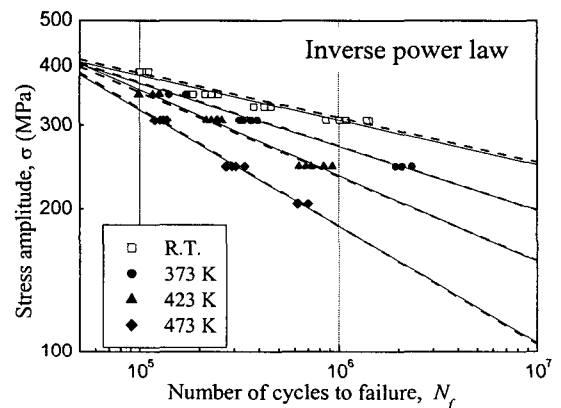


Fig. 16 Comparison between inverse power law data and experimental data

예측된 아레니우스모형과 고온 피로시험 S-N 선도 결과에서 각각의 고온 피로시험 S-N 선도와 예측된 아레니우스모형 S-N 선도는 큰 오차없이 잘 일치함을 보였다.

또한, Table 5 는 예측된 역거듭제곱모형과 고온 피로시험 피로한도 오차를 나타내었으며, 이를 다시 S-N 선도로 나타낸 것이 Fig. 16 이다. 이 결과에서도 아레니우스모형과 마찬가지로 역거듭제곱모형의 예측된 S-N 선도(점선)와 고온 피로시험 S-N 선도(실선)는 큰 오차없이 잘 일치함을 보인다.

이상의 결과를 종합해 볼 때 고온조건(373 K, 423 K, 473 K)에서 회전굽힘 피로시험을 실시하였을 때 상온 및 각각의 온도수명을 예측할 수 있었으며 실험결과와도 큰 오차없이 일치하였다. 또한 역거듭제곱모형 관계식이 쇼트피닝된 재료의 온도-수명 관계에 잘 적용되는 것을 확인할 수 있었으며, 이는 실제 쇼트피닝 가공한 금속부품에도 적용 가능할 것으로 판단된다.

4.9 시험시간 비교

Table 6 은 각 피로강도(250MPa, 300 MPa, 350 MPa)에서 고온조건의 피로수명과 상온조건의 피로수명을 비교한 결과이다. 고온조건(373 K, 423 K, 473 K)에서의 총 피로수명과 상온에서의 피로수명을 비교한 결과 300MPa 에서는 상온조건보다 약 37.5%, 250MPa 에서는 약 68.3% 시험시간이 절약되었다. 그러나 350MPa 에서는 상온조건보다 시험시간이 길게 나타났다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 고 응력범위에서는 시험편에 가해지는 응력이 크고 반복응력에 의한 표면압축잔류응력의 완화영향이 크기 때문으로 판단된다.

Table 6 Saving time by accelerated life test

Stress (MPa)	$N_{373K}+N_{423K}+N_{473K}$ (cycles)	N_{RT} (cycles)	Saving time (%)
350	351,490	213,900	-
300	721,480	1,154,020	37.5
250	3,168,830	1E7	68.3

5. 결 론

본 연구에서는 근래 국내에서 활발히 연구가 진행되고 있는 가속수명시험의 개념을 쇼트피닝 처리한 시험편에 적용하여 상온에 비해 좀더 빠른 시간에 파악된 고온피로특성 데이터들로부터 상온 피로특성을 예측하여 적절한 가속모델을 찾고 예측한 결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 피로한도 1×10^7 cycles 을 기준으로 아레니우스모형을 이용하여 예측된 상온 피로한도는 실제 상온 회전굽힘 피로시험한 시험편의 피로한도와 약 5.45%의 오차를 가지며, 역거듭제곱모형 관계식은 약 1.36%의 오차를 가져 역거듭제곱모형 관계식이 쇼트피닝된 재료의 온도-수명 관계에 잘 적용되었다.

(2) 빠른 시간에 파악된 고온 피로특성 데이터로부터 가속모델을 적용하면 실제 운전조건인 상온 피로특성을 예측할 수 있었으며, 여러 온도범위의 피로특성 예측이 가능하였다.

참고문헌

- (1) Kang Jin-Shik, Seo Yu-Won, Kim Tae-Hyung, Cheong Seong-Kyun, Shin Yong-Seung, 2002, "Effects of Re-Peening on the Fatigue Damaged SM45C Steel," *Transactions of the KSME A*, Vol. 26, No. 8, pp. 1690 ~ 1697.
- (2) Hammond, D. W. and Meguid, S. A., 1990, "Crack Propagation in the Presence of Shot-Peening Residual Stress," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 37, No. 2, pp. 373 ~ 387.
- (3) Almen, J. O. and Black, J. H., 1963, "Residual Stresses and Fatigue in Metals," *Mc Graw*, pp. 42 ~ 80.
- (4) Verpoort, C. M. and Gerdes, C., 1989, "Influence of Shot Peening on Material Properties of Turbine Blades," *Shot Peening Theory and Application, Institute for Industrial Technology Transfer International*, France, pp. 11 ~ 70.
- (5) Oshida, Y. and Daly, J., 1990, "Effects of Shot Peening on Fatigue-Damaged High Strength Aluminum Alloy," *Proc. of the 4th International Conference on Shot Peening*, Tokyo, pp. 317 ~ 326.
- (6) Dorr, T., Hilpert, M., Bechmerhagen, P., Kiefer, A. and Wagner, L., 1999, "Influence of Shot Peening on Fatigue Performance of High-Strength Aluminium and Magnesium Alloy," *The 7th ICSP*, pp. 153 ~ 160.
- (7) Lloyd W. Condra, 2001, "Reliability Improvement with Design of Experiments," *MARCEL DEKKER, INC.* pp. 229~235.
- (8) Amouzouvi, K.F., Styles, R.C., Clegg, L.J., McCooeye, D.P., Zhao, L., and Koul, A.K., 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.
- (9) Norihiko HASEGAWA, Yoshihiro WATANABE, 1993, "Effect of Shot Peening on fatigue Strength of Carbon Steel at Elevated Temperature," *ICSP-5*, pp. 157~162.
- (10) Hironobu, N. and Norio, K., "Small Crack Growth Law at Elevated Temperature in the Rotating Test of Carbon Steel," *JSM*, pp. 62~67.