

헬기용 축압기의 구조해석에 의한 가속 수명시험

이건희*, 허장욱*,#

*금오공과대학교 기계시스템공학과

Accelerated Life Test Using Structural Analysis of a Helicopter Accumulator

Geon-Hui Lee*, Jang-Wook Hur*,#

*Department of Mechanical System Engineering, Kumoh National Institute of Technology

(Received 18 March 2020; received in revised form 24 March 2020; accepted 7 April 2020)

ABSTRACT

Life tests are essential in reducing the catastrophic damage caused by the accidents of large machinery such as aircraft and ships. However, life tests are challenging to implement due to the high costs and time required to test the life of large machinery parts. Therefore, it is advantageous and convenient to apply accelerated life test techniques for key components to reduce costs and time. In fact, extensive research has already been conducted on these techniques. However, recently, there have been cases in which an experimental value was applied to the shape parameter of the Weibull distribution used in the reliability test, but the test time was not significantly reduced. Therefore, in this paper, the shape parameters are estimated from the probability density function of the Weibull distribution for the analysis of an accelerated life test for bladder accumulators, which are core components of military helicopters. The test time was derived based on the number of samples and confidence level by substituting it into the test time equation. Next, the accelerated life test time was calculated using the steady-state test time with an acceleration factor obtained from the Arrhenius model. The steady-state life test required approximately 15,000 H, whereas the accelerated life test time for one sample at 100 °C was 34% shorter than that of the steady-state life test.

Key Words : Accelerated Life Test(가속 수명 시험), Bladder Type Accumulator(축압기), Reliability Test(신뢰성 시험), Weibull distribution(와이블 분포), Arrhenius Model(아레니우스 모델)

1. 서 론

군용 및 민간용 헬기는 지상에서 사용하는 장비와 달리 공중에서 문제가 발생할 경우, 인명피해와 함께 추락에 의한 헬기 파손으로 재산에 막대한 피해를 초래하기 때문에 수명시험을 하여 부품을 적절한 시기에 교체하는 것은 매우 중요하다. 하지만 수명시험

은 예산과 시간이 많이 소요되어 쉽게 적용하지 못하고 있다. 따라서 핵심 구성품의 수명시험 비용과 기간을 단축하기 위해서는 가속 수명시험 기법이 문제점을 해결할 수 있는 적절한 방식이며, 이러한 기법과 관련한 많은 연구가 수행되고 있다¹⁻⁴⁾. 또한, 신뢰성 시험 설계에 대한 연구 결과에 따르면, 와이블 분포의 형상 모수에 실험값을 적용한 경우도 있지만, 이러한 경우 많은 수의 시험이 요구되는 단점이 있다¹⁾.

따라서, 본 논문에서는 군용 헬기의 블래더형 축압

Corresponding Author : hhjw88@kumoh.ac.kr

Tel: +82-54-478-7399, Fax: +82-54-478-7319

기를 대상으로 수명시험을 해석하기 위하여 와이블 분포의 확률밀도함수에서 단순 회귀법과 함께 카이제곱 분포표 등을 이용하여 형상모수를 추정하고, 이를 시험시간 식에 대입하여 시료 수와 신뢰수준에 따른 시험시간을 도출하였다. 또한, 아레니우스 모델에서 구한 가속계수와 신뢰수준에 따른 시험시간을 이용하여 블래더의 가속 수명시험 시간을 계산하였다.

2. 관련 이론

2.1 정상 수명시험 관련 이론

장비의 사용 연한에 따라 순간 고장률이 일정한 관계를 가지고 변하기 때문에 와이블 분포는 여러 종류의 고장 현상을 모사할 수 있도록 만든 확률분포이며, 확률밀도함수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[5].

$$f(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t-r}{\eta}\right)^{\beta-1} e^{-\left(\frac{t-r}{\eta}\right)^\beta} \quad (1)$$

여기서, β 는 형상모수, η 는 척도모수, r 은 위치모수를 의미하며, 위 식에서 통계적 방법으로 형상모수 β 를 추정하기 위하여 $r=0, t_0=\eta^\beta$ 이라고 하면 신뢰도함수 $R(t)$ 와 평균수명(μ)은 다음과 같이 표현할 수 있다^[5].

$$R(t) = e^{-\frac{t^\beta}{t_0}} \quad (2)$$

$$\mu = t_0^{\frac{1}{\beta}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{\beta}\right) \quad (3)$$

단순 회귀법으로 형상모수를 추정하기 위해 식 (2)의 양변에 \ln 을 취하면 다음과 같다.

$$\ln \ln \frac{1}{R(t)} = \beta \ln t - \ln t_0 \quad (4)$$

또한 식 (4)에 $R(t)$ 대신 $1-F(t)$ 를 대입하면 식 (5)와 같으며, 식 (3)를 1차 함수 형태로 표현하면

식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln \ln \frac{1}{1-F(t)} = \beta \ln t - \ln t_0 \quad (5)$$

$$y = \beta x + b \quad (6)$$

여기서,

$$y = \ln \ln \frac{1}{1-F(t)}, \quad x = \ln t, \quad b = -\ln t_0$$

이 회귀선의 계수를 최소자승법에 의해 구하면, 식 (7)과 같이 표시할 수 있다.

$$\beta = \frac{r \sum x_i y_i - \sum x_i \sum y_i}{r \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (7)$$

형상모수가 β 인 와이블 분포에서 n 개의 아이템을 정해진 기간 t_0 까지 시험하였을 때, B_x 수명이 t^* 이상임을 알고 있을 경우, 카이제곱 분포 표를 이용하여 신뢰수준 $100(1-\alpha)\%$ 로 보증할 수 있는 샘플의 크기를 구하는 식을 다음과 같이 도출할 수 있다^[5].

$$n \geq \left(\frac{t^*}{t_0}\right)^\beta \times \frac{x_{1-\alpha, 2(k+1)}^2}{2} \times \frac{1}{\ln(\alpha)^{-1}} \quad (8)$$

여기서, α 는 신뢰수준, k 는 합격판정계수, n 은 시료 수, t^* 는 신뢰도 예측 값을 의미한다. 또한 신뢰도 예측 값 t^* 는 MTBF로 변환이 가능하며, 시험시간 $t(=t_0)$ 에 대하여 식을 정리하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다^[5, 6].

$$t \geq \left[\frac{x_{1-\alpha, 2(k+1)}^2}{2 \cdot n \cdot \ln(\alpha)^{-1}} \right]^{\frac{1}{\beta}} \times MTBF \quad (9)$$

2.2 가속 수명시험 관련 이론

온도를 파라미터로 하는 가속 수명시험의 모델은 아레니우스 모델이 주로 사용되며, 이때 수명-스트레스 관계식은 식 (10)과 같다^[6].

$$L = A \exp\left(\frac{E_a}{kT}\right) \quad (10)$$

여기서, L은 수명, T는 절대온도, k는 볼츠만 상수, E_a 는 활성화 에너지, A는 제품의 구조 및 시험방법에 따른 상수이다. 식 (10)에서 정상상태의 절대온도(T_s)와 가속 상태에서의 절대온도(T_a)를 반영하여 정리하면 식 (11)과 같이 표현할 수 있다⁷⁾.

$$A_f = \exp\left[\frac{E_a}{k} \cdot \left(\frac{1}{T_s} - \frac{1}{T_a}\right)\right] \quad (11)$$

3. 축압기의 구조해석

3.1 축압기의 기능과 형상

헬기에 장착되는 축압기는 유압시스템의 충격과 진동을 흡수하고, 유압유의 온도 변화에 따른 부피 변화를 제어하며, 유압펌프 고장시 저장된 오일을 공급하여 일정한 유량을 유지하는 등의 기능을 수행하는 헬기의 핵심 구성품 중 하나이다.

축압기 중 비교적 소형으로 효율이 높은 블래더형 축압기의 경우 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 블래더, 하우징, 가스 밸브 및 유압 포트로 크게 구분할 수 있으며, 기체(질소)와 유압 사이가 완전히 분리된 형태로 되어 있다⁸⁾.

3.2 축압기 해석

축압기의 재질은 고무(HNBR)를 사용하는 블래더를 제외하고, 모든 부품은 스테인레스 강을 적용하고 있으며, 축압기 운용간 유압은 0.98 ~ 14 MPa, 질소는 3.5 MPa이다. 피로 해석을 위한 S-N Curve는 Fig. 2에 표시하고 있으며, 재료의 기본적인 물성값을 Table 1에 나타내었다⁹⁾.

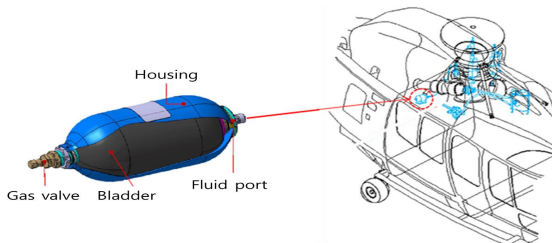


Fig. 1 Accumulator components

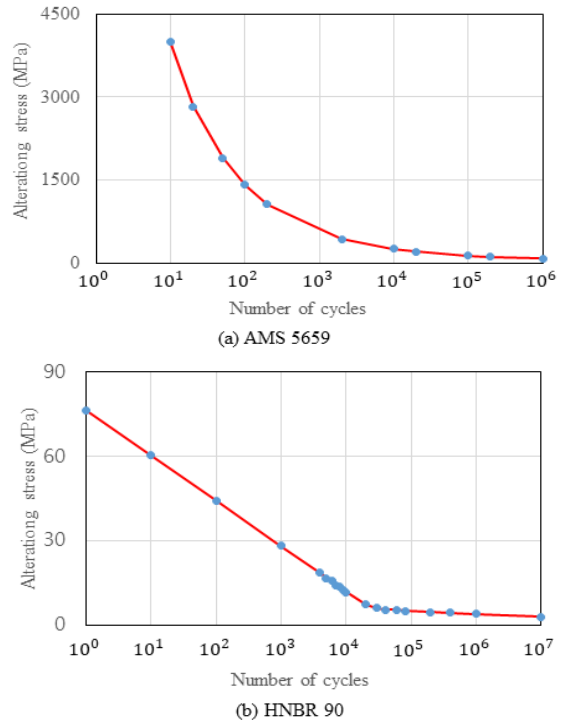


Fig. 2 S-N curve of materials

Table 3 Material properties

Division	HNBR 90	Stainless steel
Density (kg/cm^3)	1,180	7,850
Tensile strength (MPa)	28.6	250
Young's modulus (MPa)	30.8	2.0×10^5

축압기의 형태는 축 대칭 형상이므로 Fig. 3과 같이 모델링을 2D로 하여 간략화하였다. 해석 모델은 외부 하우징의 위쪽에 가스 밸브, 아래쪽에 유압 포트가 부착되어 있고, 블래더 안에는 내부 충전물이 들어있는 형상이다. 모델의 접촉조건은 가스 밸브와 하우징, 가스 밸브와 블래더 및 유압 포트와 하우징을 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 모두 Bonded로 분리가 불가능 하도록 설정하였으며, 블래더와 하우징은 Frictional 조건의 마찰계수를 0.2로 고려하였다. 이러한 접촉조건은 실제 축압기가 조립되어 있는 형태와 가장 유사하며, 블래더와 내부 충전물의 접촉은 질소가 항상 일정한 압력을 블래더

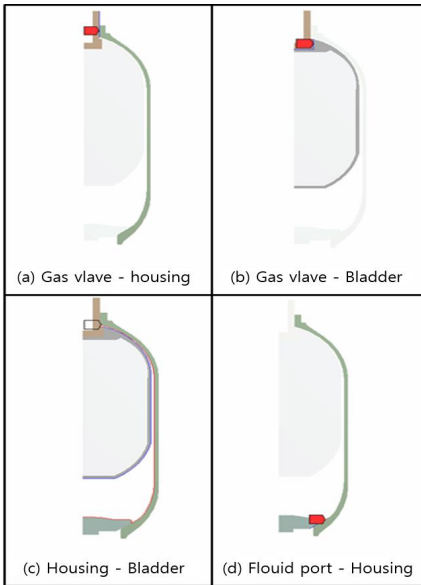


Fig. 3 Contact conditions in analysis

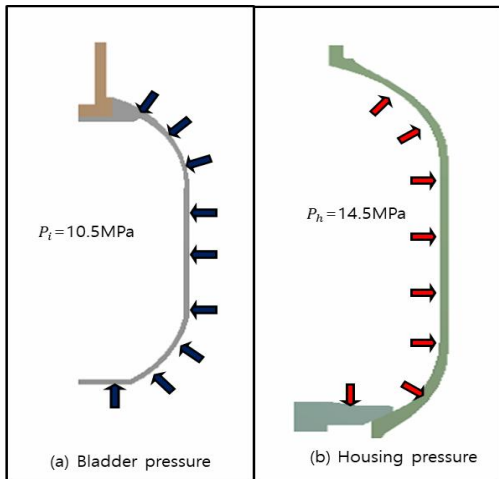


Fig. 4 Pressure conditions in analysis

에 부가하고 있기 때문이다.

축압기는 블래더와 하우징 사이의 작동 유체 흐름에 따라 블래더가 압축과 팽창을 하게 되는데, 이때 작동 유체의 최대압력은 14 MPa이며, 이는 하우징에 가해지는 압력(P_h)과 동일하고, 작동 유체의 최대 온도는 약 38℃이다.

해석에서 메시의 형상은 균일하게 분할하였으며,

메시 Quality의 경우 Workbench내의 모듈로 확인한 결과 0.999로 1에 가까워 메시 Quality가 양호함을 알 수 있다. 또한, 블래더는 174,838개의 요소와 57,071개의 질점으로 분할하였으며, 하우징은 20,270개의 요소와 6,351개의 질점으로 구분하였다^[3].

4. 수명시험 설계

4.1 정상상태 수명시험시간 도출

수명을 나타내는 와이ابل 분포는 확률분포로 표시되며, 신뢰수준을 고려시 최소 13개 이상의 실험값을 사용하기 때문에 구조해석 프로그램의 수명해석 tool인 Fatigue 모듈을 이용하였다. 이때 온도는 5%씩 증가하여 해석을 수행하였으며, 해석결과는 Table 2에 나타낸 바와 같다. 온도의 단위는 절대온도를 사용하였으며, 온도가 올라감에 따라 블래더의 피로 수명 Cycle 수가 급격히 줄어드는 것을 알 수 있다.

이러한 수명 값을 MINITAB 프로그램의 통계분석 기능을 이용하여 표본 수 13개의 확률분포 그래프를 산출한 결과를 Fig. 5에 나타내었으며, 표본평균 9,534.5, 형상모수 7.1 및 척도모수 10,169.7로 계산되었다. 막대 그래프는 수명에 따른 표본의 개수를 나타내며, 점선은 막대 그래프의 분포에 따른 확률분포이다.

Table 2 Result of life analysis according to temperature

No.	Temperature(K)	Fatigue Life(cycle)
1	217	12,181
2	233	11,628
3	248	11,101
4	264	10,597
5	279	10,116
6	295	9,592
7	311	9,075
8	326	8,783
9	342	8,535
10	357	8,294
11	373	9,060
12	388	7,692
13	404	7,294

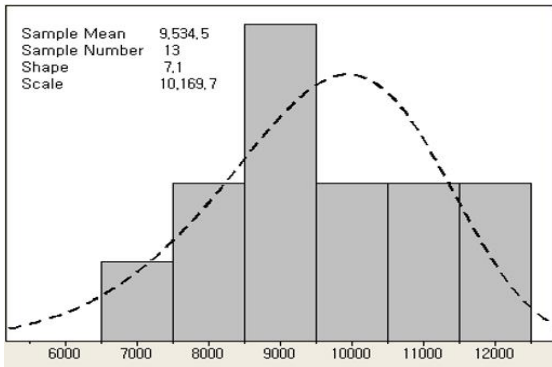


Fig. 5 Probability Distribution graph

Table 3 Test time according to the number of sample and confidence level

The number of sample	Confidence level	Test time(H)
1	0.6	10,859
	0.7	11,872
	0.8	13,214
	0.9	15,451
2	0.6	9,847
	0.7	10,766
	0.8	11,983
	0.9	14,012
3	0.6	9,300
	0.7	10,167
	0.8	11,317
	0.9	13,233

MINITAB에서 산출한 형상 모수 값을 식 (7)에 대입하여 계산한 블래더의 수명을 Table 3에 나타내었다. 최소한의 시료 수량으로 신뢰수준 90%를 얻기 위한 정상상태의 수명시험은 15,451H가 필요하며, 동일한 시료 수를 대상으로 신뢰수준을 향상하거나, 동일한 신뢰수준을 대상으로 시료 수를 축소하려면 시험시간의 연장이 필요함을 알 수 있다.

4.2 가속 수명시험 시간 도출

아레니우스 모델의 수명-스트레스 관계식인 식(10)에서 블래더의 열화 고장 메커니즘의 활성화에너지, 볼츠만 상수 및 형상모수를 Table 4에 나타내었다. 정상상태의 온도(38°C)와 최대압력 14 MPa 을

기준

Table 4 Characteristic value

Activation energy	Shape parameter	Boltzmann constant
0.0674 eV	7.0886	8.6173×10^{-5} eV/K

Table 5 Accelerate factor

Temp.(°C)	50	60	70	80	90	100
Accelerate factor	1.09	1.18	1.26	1.34	1.43	1.51

Table 6 Life according to confidence level($\times 10^3$)

Temp(°C) \ Confidence level	0.6	0.7	0.8	0.9
50	9.8	10.8	12.0	14.0
60	9.1	10.0	11.1	13.0
70	8.5	9.3	10.4	12.2
80	8.0	8.8	9.7	11.4
90	7.5	8.2	9.2	10.7
100	7.1	7.8	8.6	10.2

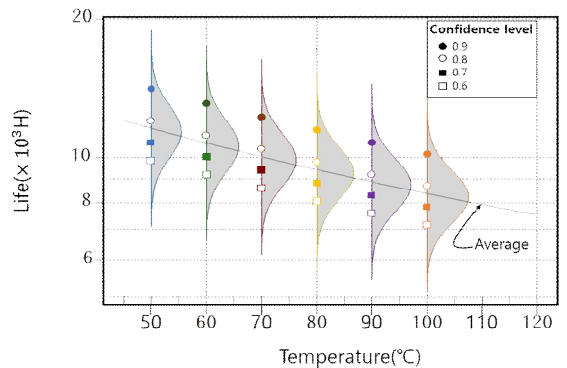


Fig. 6. Life according to temperature

으로 온도 변화에 따른 가속 계수는 Table 5와 같이 계산되었다^[4]. 정상상태의 수명시험에 대해 10 0°C에서의 가속시험은 가속계수가 1.51로 약 34% 시험시간을 단축할 수 있다.

온도에 따른 가속 계수로 정상상태의 시험시간을 나누어 가속 수명시험 시간을 계산하여 Table 6에

나타내었다. 시료 수 3개로 신뢰수준 90%를 얻기 위한 100℃에서의 가속수명 시험시간은 약 8,880H로 최소 시료 수량에 의한 신뢰수준 90%에서의 정상상태 수명시험 시간 보다 약 43%가 축소되었다.

온도에 따른 분포로 표시하면 Fig. 6과 같으며, 중심을 지나가는 직선은 이러한 값들의 평균치를 나타내고, 온도가 올라감에 따라 시험시간이 감소하고 있다. 또한, 각 온도에서 점들은 신뢰수준에 따른 시험시간을 나타내고, 신뢰수준이 높을수록 시험시간이 길어짐을 알 수 있다.

5. 결 론

축압기를 대상으로 수명시험을 해석하기 위하여 와이블 분포를 이용하여 형상 모수를 추정하고, 이를 카이제곱 분포포 대입하여 정상상태와 가속 상태의 시료 수와 신뢰수준에 따른 시험시간을 도출하였다. 얻어진 결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 최소한의 시료 수량으로 신뢰수준 90%를 얻기 위한 정상상태의 수명시험은 15,451H가 필요하다.
2. 정상상태의 수명시험에 대해 100℃에서의 가속 시험은 가속계수가 1.51로 약 34% 시험시간을 단축할 수 있다.
3. 시료 수 3개로 신뢰수준 90%를 얻기 위한 100℃에서의 가속 수명 시험시간은 약 8,800H로 최소 시료 수량에 의한 신뢰수준 90%에서의 정상상태 수명시험시간 보다 약 43% 축소할 수 있다.

REFERENCES

1. Lee, K. H., Yun, W. Y., "Accelerated Life Test Design for Vacuum Cleaner Motors", Journal of Applied Reliability, pp. 47-58, 2009.
2. Eom, H. K., Wei, S. H., Kim, H. M., Lee, H. B., "A Study on Accelerated Life Test Method of Blower Motor", KSAE Annual Spring Conference, pp. 1619-1624, 2011.
3. Kim, D. Y., Hur, J. W., "Accelerated Life Test Design of Bladder Type Accumulator Assembly

for Helicopter", 2018.

4. Kim, D. Y., Hur, J. W., "Life Fatigue Prediction of an Accumulator Composed of Bladder and Housing", Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 2018.
5. Kleyner, A., & Boyle, J., "Demonstrating Product Reliability Theory and Application", In Tutorial Notes of Annual Reliability and Maintainability Symposium, pp.1-5, 2002.
6. Yang, I. Y., Kang, J. G., Yu, S. W., Oh, G. T., Na, Y. G., "Development of Accelerated Life Test Method for Constant Electrical Potential Electrolysis Gas Sensor", Journal of Applied Reliability, pp. 180-191, 2016.
7. Park, J. H., Lee, S. H., Jang, H. D., Kim, G. S., Yang, J. S., "Prediction of Characteristics Life of the Rubber Gasket", Journal of Applied Reliability, pp. 213-235. 2010.
8. Woo, C. S., Kim, W. D., Park, H. S., "Fatigue life prediction and evaluation of rubber component under repeated loading", KSME Spring Conference, pp. 275-276, 2013.
9. Lee, G. H., Choi, S. D., Hur, J. W., "Acceleration Life Test Analysis of Accumulator by Estimating Shape Parameter", KSMPE Spring Conference, pp. 54, 2019.