

로드리스 실린더의 수명 특성에 관한 연구 A Study on the Life Characteristic of Rodless Cylinder

이충성¹ · 임재학² · 강보식^{1*}

C. S. Lee, J. H. Lim and S. B. Kang

Received: 06 Feb. 2015, Revised: 05 Mar. 2015, Accepted: 06 Mar. 2015

Key Words : Life characteristic(수명 특성), Pneumatic Cylinder(공압 실린더), Rodless Cylinder(로드리스 실린더), Scale Parameter(척도 모수), Shape Parameter(형상 모수)

Abstract: Pneumatic cylinders are classified into rod-type pneumatic cylinders and rodless pneumatic cylinders depending on the presence of the rod. Rodless cylinders have a constant area and have no deflection. Rodless cylinders are widely used in automatic systems requiring high-speed performance and high-precision transportation. However, the research of the pneumatic cylinder has been focused on the structure and life characteristics. In this research, aging characteristics and shape parameter analysis which are related to the lifetime were investigated. By conducting the lifetime tests with two different materials for the transfer plate, the failure mode and lifetime characteristics were analyzed. By the Anderson-Darling (A-D) verification based on the complete data set, the analysis results of lifetime distribution, shape parameter, and scale parameter were provided.

기호 설명

- B_{10} : 전체 대상의 10 %가 고장 나는 시점
- MTTF : 평균고장시간
- β : 와이블 분포의 형상모수
- η : 와이블 분포의 척도모수(특성수명)

1. 서 론

공압 실린더는 전자제품생산 자동화 설비 및 반도체 라인 등에서 이송장치의 핵심품으로 널리 사용되고 있다. 실린더는 크게 로드와 로드리스에 따라 일반

공압 실린더와 로드리스(rodless) 실린더로 나누어진다. 본 연구에서 연구 대상으로 사용한 로드리스 실린더는 일반 로드형 공압 실린더와 달리 실린더에 로드 없이 구조로 실린더 내부의 피스톤 면적이 동일하여 균일한 힘을 발생시키고 로드 없이 작동하는 장점으로 인하여 고속 왕복 작동 및 부하 이송 특성을 필요로 하는 자동화 생산 설비 등에 최근 널리 사용되고 있다.

그러나 로드리스 실린더는 일반 공압 실린더와 달리 벨트 세퍼레이터, 더스트 쉴 밴드 등 내부 구성품이 많아 현재까지 연구된 공압 실린더의 가속 수명 시험을 통해 얻어진 고장 모드 및 형상 모수 등의 자료(1-3) 등을 그대로 적용하기에는 어려움이 많은 실정이다. 또한, 로드리스 실린더의 수명 특성은 설비 수명과의 밀접한 관계에 있으며(4), 이러한 이유로 산업 현장에서 로드리스 실린더의 수명 특성과 고장분석에 대한 요구가 날로 높아지고 있다.

하지만 현재까지 로드리스 실린더에 대한 연구는 성능 특성에 한정된 경우가 대다수이며 유사 실린더의 경우에도 성능적인 측면만 부각되어 있을 뿐 수명에 대한 연구는 전무한 실정이다.

* Corresponding author: kbs668@kimm.re.kr
 1 Korea Institute of Machinery & Materials, Daejeon 305-343, Korea
 2 Department of Economics & Business administration, Hanbat University, Daejeon 305-719, Korea
 Copyright © 2015, KSFC

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

따라서 본 연구에서는 로드리스 실린더의 수명 시험을 통해 완전 데이터를 바탕으로 로드리스 실린더의 고장 모드 정립 및 수명 예측에 활용되는 모수인 형상 모수, 척도 모수, MTTF(평균 수명), B_{10} 수명 등을 제시하고자 한다.

2. 로드리스 실린더 구조 및 시험 방법

2.1 로드리스 실린더 구조 및 선정

로드리스 실린더의 구조는 Fig. 1과 같이 외부 이물질 유입 방지를 위한 더스트 씰 밴드, 압축 공기의 외부 누설 방지를 위한 씰 벨트, 압축 공기의 힘으로 제품을 이송시키는 이송 플레이트 등으로 구성되어지며, 시험 대상품의 사양은 내경 40mm, 스트로크 1,000mm, 최고 사용 압력 1,000kPa 이다.

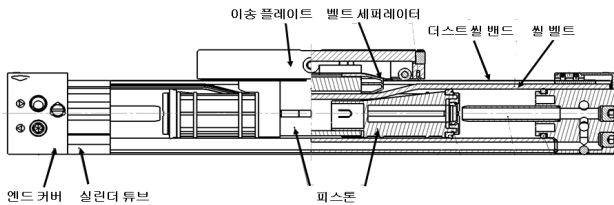


Fig. 1 Structure of rodless cylinder

본 연구에서는 고장 모드 확인을 위하여 동일사양의 로드리스 실린더에 대하여 산업계에서 주로 사용되는 제조사 제품의 재질과 사양을 고려하여 대표되는 종류의 로드리스 실린더(Test cylinder I, II)를 시험 시료로 선정하였으며, 제조사 별 시험 수량 및 구성 재질은 Table 1과 같다.

Table 1 Test sample

	Apparatus of test cylinders for failure mode test	Materials	Test quantity
Test cylinder I		Aluminum	4
Test cylinder II		Aluminum + Plastic	2

또한, 형상 모수 및 척도 모수의 도출을 위한 수명 시험에서는 고장 모드에 대한 고장 분석 결과를 바탕으로 품질 안정화가 이루어진 시험 실린더 I에 대하여 10개를 대상으로 시험하였다.

2.2 시험 방법

본 로드리스 실린더의 수명시험장치는 ISO 19973-3 5)과 KS B 6518 6), JIS B 8377-1 7)에 따라 Fig. 2와 같이 구성하였으며, 작동 조건은 Table 2와 같다.

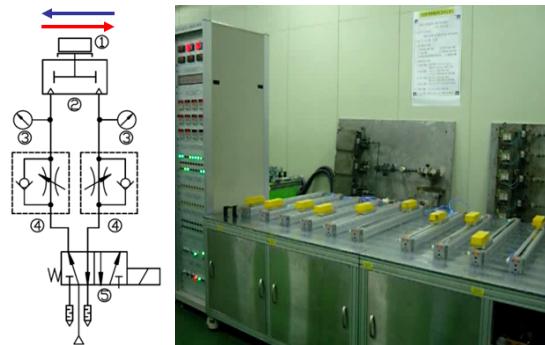


Fig. 2 The apparatus of life test of rodless cylinder

Table 2 Test conditions

	Operating condition
Load	3 kg
Operating speed	500mm/s

로드리스 실린더 수명 시험을 위하여, 로드리스 실린더의 이송 플레이트에 부하를 장착하였다. 장착되는 부하의 기준은 ISO 19973-3 5)을 활용하였으며, 장착 위치는 Fig. 3과 같이 이송 플레이트 중심을 기

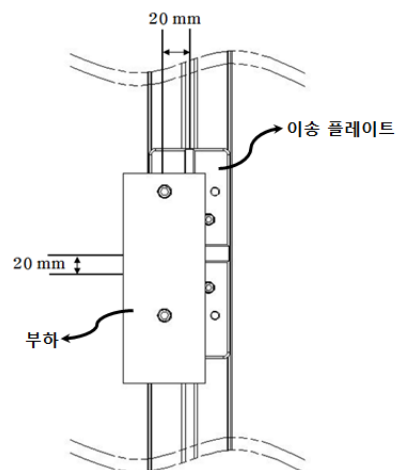


Fig. 3 Location of the installation

준으로 부하의 중심을 20mm씩 띄운 상태로 장착하여 내부 피스톤 셀에 편심을 가하는 것으로 결정하였다.

3. 고장 분석

3.1 고장 분석을 위한 시험 결과

고장 분석을 위하여 로드리스 실린더(Test cylinder I, II) 시료 총 6개를 선정하여 고장이 발생할 때까지 시험을 진행하였다. 그 결과 더스트 셀 밴드 파손 및 셀 벨트 이탈, 이송 플레이트 파손, 벨트 세퍼레이터 파손, 외부 누설 등이 발생하였고 분석 결과는 다음과 같다.

3.1.1 이송 플레이트 파손

시험 실린더 II의 2개 시료 모두 Fig. 4와 같이 이송 플레이트 파손 현상이 발생하였고, 고장 발생 사이클은 240,315 사이클과 451,357 사이클로 확인되었으며, 고장의 원인으로서는 이송 플레이트의 작동시 발생하는 관성 충격에 의해 파손된 것임을 확인하였다.



Fig. 4 Failure of transfer plate

3.1.2 더스트 셀 밴드 파손

시험 실린더 I의 2개 시료에서 Fig. 5와 같이 더스트 셀 밴드 파손 현상이 발생하였으며, 고장 사이클은 약 310,152 사이클과 541,275 사이클로 확인하였고, 이에 대한 고장의 원인은 이송 플레이트의 작동시 더스트 셀 밴드에 작용하는 인장력에 의해 파손된 것으로 확인되었다.

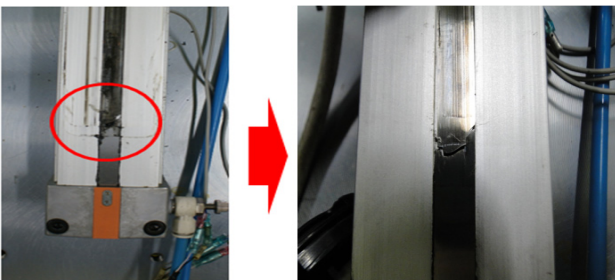


Fig. 5 Failure of dust seal band

3.1.3 셀 벨트 이탈

시험 실린더 I의 1개 시료에서 Fig. 6과 같이 셀 벨트 이탈 현상이 발생하였으며, 고장 발생 사이클은 1,154,684사이클로 확인하였다.

이에 대해 고장 분석을 수행한 결과 반복 작동시 발생하는 마찰과 로드리스 실린더 내부에 투입된 압축 공기에 의해 셀 벨트의 이탈 현상이 발생된 것으로 분석되었고, 추후 발생하는 고장 영향을 고려하였을 때, 내부 압력 불가로 인해 자동화 생산 라인에 영향을 미칠 것으로 예상된다.

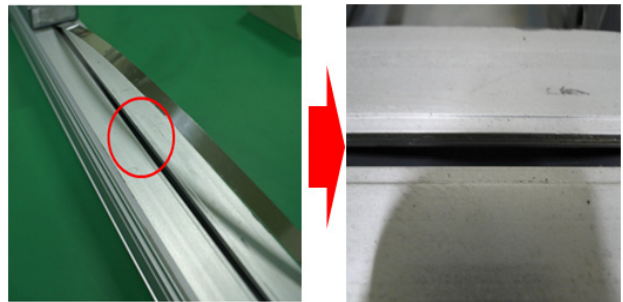


Fig. 6 Failure of seal belt

3.1.4 벨트 세퍼레이터 파손

시험 실린더 I의 1개 시료에서 Fig. 7과 같이 벨트 세퍼레이터 파손이 발생하였으며, 고장 발생 사이클은 295,437 사이클로 확인하였다.

고장 원인을 파악하기 위해 로드리스 실린더에 발생하는 진동을 측정하였고, 측정 결과 Table 3과 같이 고장이 발생한 로드리스 실린더가 정상 상태의 로드리스 실린더보다 약 3배 이상 높은 진동 충격이 측정되었다.

이에 대한 원인으로서는 로드리스 실린더 내부에 장착된 에어쿠션 조절 나사의 풀림에 의해 높은 진동 충격이 발생하여 벨트 세퍼레이터가 파손된 것으로 확인되었다.

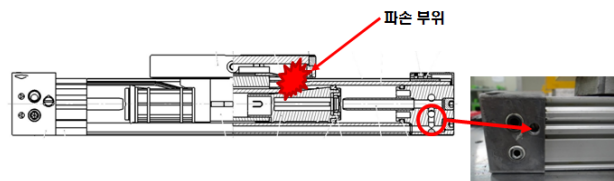
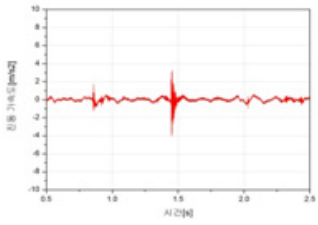
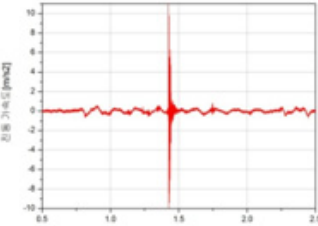


Fig. 7 Failure of belt separator

Table 3 Vibration of rodless cylinder

	Vibration Graphs	Vibration peak point
Test cylinder I (normal)		3.56m/s ²
Test cylinder I (fail)		10.47m/s ²

3.2 고장 모드 정립

로드리스 실린더의 고장 모드 분석을 위하여 시험 실린더 I, II에 대하여 시료 6개를 시험하였고, 그 결과를 Table 4와 같이 정립하였다.

Table 4 Failure mode of rodless cylinder

Main components	Failure mode	Failure mechanism
Piston Seal	Leak	Wear
	Seal hardening	Poor lubrication
	Not maintain pressure	Fatigue
Seal belt	Leak	Wear
	Not maintain pressure	Fatigue
Transfer plate	Breakage	Fatigue
	transform	External action
Dust Seal band	Breakage	Fatigue

그리고 고장 모드 비교를 위하여 Table 5와 같이 일반 공압 실린더의 고장 모드를 확인하였으며, 일반 공압 실린더와 로드리스 실린더의 고장 모드를 비교한 결과 일반 공압 실린더의 주요 고장 모드는 피스톤 씰의 윤활 저하에 의한 작동 압력 증가로 나타났으나8), 로드리스 실린더의 경우 주요 고장 모드는 씰 벨트의 마모로 인한 누설로 확인되었다.

Table 5 Failure mode of pneumatic cylinder

Main components	Failure mode	Failure mechanism
Piston Seal	Leak	Wear
	Seal hardening	Poor lubrication
	Not maintain pressure	Fatigue
Rod Seal	Leak	Wear
	Seal hardening	Poor lubrication
	Not maintain pressure	Fatigue
Cylinder tube	Breakage	Fatigue
	transform	Alternating load
Head/rod cover	Breakage	Overpressure

로드리스 실린더와 일반 공압 실린더의 주요 고장 모드가 다른 점에 대하여 구조적으로 분석한 결과 일반 공압 실린더의 경우 Fig. 8과 같이 실린더 튜브와 피스톤 씰의 마찰, 즉 강체와 씰의 마찰에 의해 고장이 발생하였지만, 로드리스 실린더는 Fig. 9와 같이 씰 벨트와 피스톤 씰 마찰, 즉 씰과 씰 마찰로서 고장 원인이 서로 달라 고장 모드가 다르다는 것을 확인하였다.

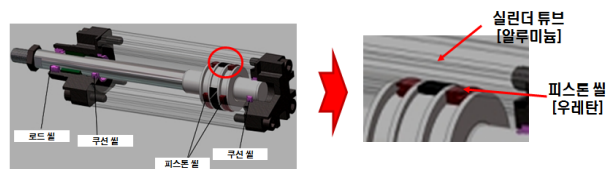


Fig. 8 Friction mechanism of pneumatic cylinder

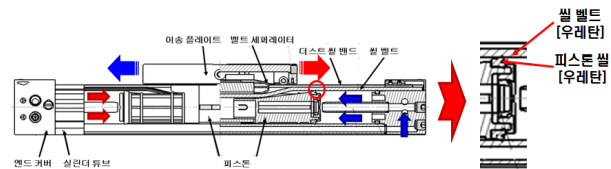


Fig. 9 Friction mechanism of rodless cylinder

3.3 연구 대상품 2종에 대한 수명 분석

위에서 발생한 고장 시점을 바탕으로 미니텡 (Minitab) 소프트웨어를 활용하여 수명을 분석하였으며, 분석 기법은 최소 제곱법으로 하였고, 이에 대한 결과는 다음과 같다.

3.3.1 연구 대상품1의 수명 분석

시험 실린더 I의 고장 사이클을 바탕으로 수명 분석에 앞서 수명 분포 적합도 분석을 수행하였다. 이에 대하여 Fig. 10과 같은 결과가 도출되었으며, 수명 분포 특성은 와이블(Weibull) 분포는 0.900, 대수정규(lognormal) 분포는 0.941, 3모수 와이블(3-parameter weibull) 분포는 0.994로 도출되어 3모수 와이블(3-parameter weibull) 분포가 시험 대상품 1(알루미늄 재질) 로드리스 실린더의 수명 분포에 가장 적합함을 확인하였다.

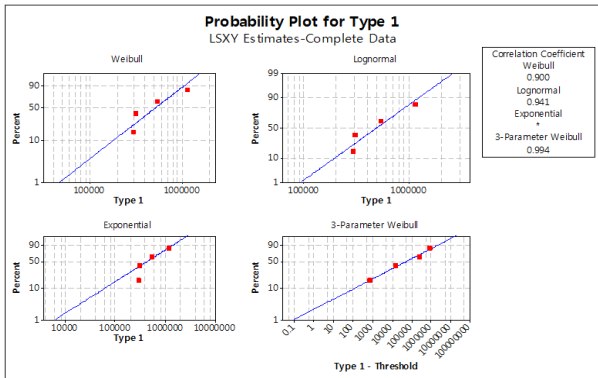


Fig. 10 Results of goodness of fit test[test cylinder1]

또한, 형상 모수 및 척도 모수 도출을 위하여 수명 분석을 수행한 결과 Fig. 11과 같은 결과가 도출되었고 형상모수(β)는 0.32, 척도모수(η)는 172,303 사이클이며, 또한 평균수명(MTTF)은 1,505,611 사이클로 확인하였다.

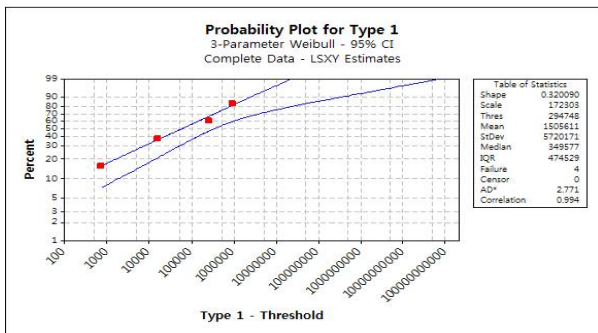


Fig. 11 Weibull Probability Analysis[test cylinder1]

3.3.2 연구 대상품2의 수명 분석

시험 실린더 II는 Fig. 12와 같은 결과가 도출되었고, 수명 분포 특성은 와이블 분포를 따르고 있으며 형상모수(β)는 2.02, 척도모수(η)는 407,048 사이클, 평균수명(MTTF)은 360,675 사이클로 확인하였다.

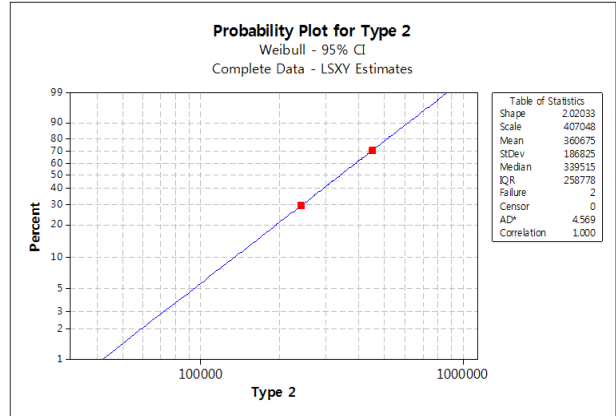


Fig. 12 Weibull Probability Analysis[test cylinder2]

3.3.3 시험 실린더 I, II에 대한 수명 분석 결과

시험 실린더 I, II에 대하여 수명을 분석한 결과 시험 실린더 I은 시간이 지남에 따라 고장률이 감소하는 경향을 나타냈으며, 이에 대한 원인은 조립상의 결함으로 확인되었다9).

그러나 시험 실린더 II는 시간이 지남에 따라 고장률이 증가하고 있었으며, 이에 대한 원인은 재질의 부적절한 선정에 의한 것으로 확인되었다.

또한, 결과를 비교하였을 때, 척도모수(η)에서는 시험 실린더 II가 시험 실린더 I에 비해 2배 가량 높았으나, 평균 수명(MTTF) 비교에 있어 시험 실린더 I이 시험 실린더 II에 비해 5배 가까이 높게 추정됨을 확인하였다.

4. 성능 열화 및 수명 분석

4.1 성능 열화 분석

로드리스 실린더의 성능 열화 분석 및 형상 모수, 척도 모수, MTTF(평균 수명), B₁₀ 수명 등을 도출하기 위하여 품질 안정화가 이루어진 시험 실린더 I에 대해 10개를 선정하여 수명 시험을 진행하였다. 수명 시험 도중 성능 열화를 분석하기 위하여 300,000 사이클 마다 주요 성능 열화 시험 항목인 누설 시험을 진행하였다.

누설 시험의 고장 판정 기준은 KS B 6518 3), JIS B 8377-1 4)규격을 참고하여 61.2 L/h로 하였으며, 수명에 따른 누설 열화 그래프는 Fig. 13과 같고, 고장 데이터는 Table 6과 같다.

시험 결과 2,100,000 사이클까지 10개의 시료 중 10개의 시료 모두 누설로 인한 고장이 발생하였고, 최초 고장은 약 600,000 ~ 900,000 사이클 구간에서 누설이 초과됨을 확인하였다.

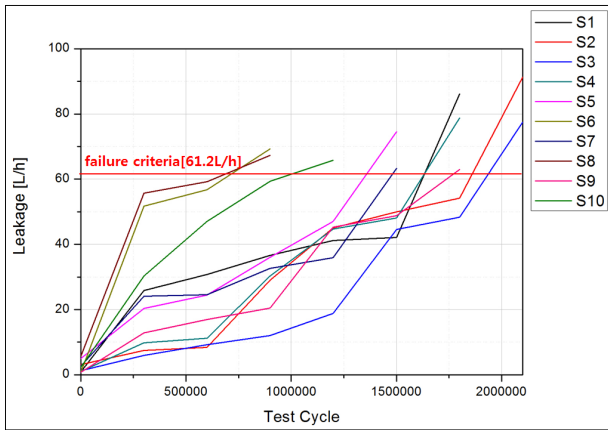


Fig. 13 Leakage of rodless cylinder

Table 6 Failure data of rodless cylinder

No.	Failure cycle	Leakage rate
S1	1,500,000 ~ 1,800,000	86.16 L/h
S2	1,800,000 ~ 2,100,000	91.32 L/h
S3	1,800,000 ~ 2,100,000	77.46 L/h
S4	1,500,000 ~ 1,800,000	78.72 L/h
S5	1,200,000 ~ 1,500,000	74.52 L/h
S6	600,000 ~ 900,000	69.30 L/h
S7	1,200,000 ~ 1,500,000	63.30 L/h
S8	600,000 ~ 900,000	67.26 L/h
S9	1,500,000 ~ 1,800,000	63.00 L/h
S10	900,000 ~ 1,200,000	65.82 L/h

4.2 수명 분석

로드리스 실린더의 10개의 완전 고장 데이터를 기반으로 수명 분석을 진행하였고, 수명 분석은 최우추정법을 활용하였다. 수명 분석에 앞서 수명 분포의 적합도를 확인하기 위하여 Fig. 14와 같이 Anderson-Darling(A-D) 검정을 통해 분포 적합도를 확인하였고, 그 결과 와이블(Weibull) 분포는 4.357, 대수정규(lognormal) 분포는 4.409, 지수(exponential) 분포는 4.965로 도출되었다.

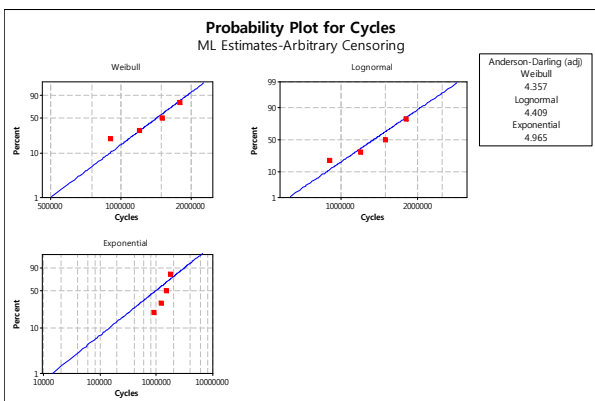


Fig. 14 Results of goodness of fit test

도출된 A-D 통계치를 바탕으로 와이블(Weibull) 분포가 가장 작은 값을 가지므로 로드리스 실린더의 수명분포는 와이블(Weibull) 분포가 적합한 것으로 확인하였다9).

로드리스 실린더의 고장 데이터를 기반으로 미니탭(Minitab) 소프트웨어를 활용하여 수명분포인 와이블 분포의 모수 및 척도 모수를 추정한 결과 Fig. 15와 같다.

여기서 도출된 형상모수(β)는 4.07, 척도모수(η)는 1,560,044 사이클이며, 또한 평균수명(MTTF)은 1,415,476 사이클로 확인하였다.

형상 모수 및 척도 모수 등을 통해 B_{10} 수명을 도출할 수 있으며, 관련 식은 아래와 같다.

$$B_{10} = \eta \times (-\ln(1 - p))^{1/\beta} \tag{1}$$

위에서 도출된 데이터를 식에 대입하여 B_{10} 수명을 추정한 결과 897,446 사이클로 확인되었다.

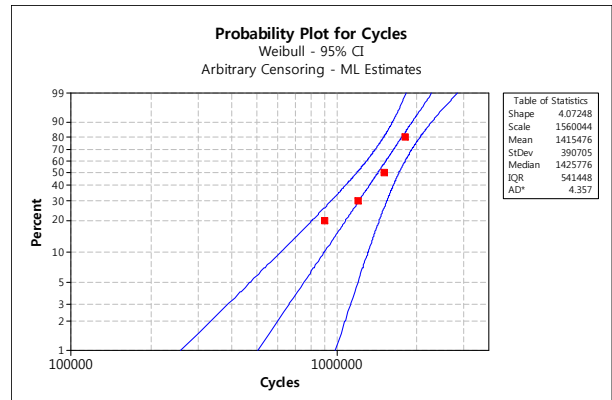


Fig. 15 Weibull Probability Analysis

또한, 일반 공압 실린더의 수명을 확인한 결과 평균수명(MTTF)은 2.4043×10^7 사이클이며, B_{10} 수명은 6.8030×10^6 으로 확인되었다8).

5. 결 론

본 연구에서는 로드리스 실린더의 고장 모드 정립을 위해 이송 플레이트의 재질이 다른 실린더 2종(알루미늄, 알루미늄+플라스틱) 6개에 대해 시험하였다. 또한, 형상 모수, 척도 모수, MTTF(평균 수명), B_{10} 수명 등을 확인하기 위하여 알루미늄 이송 플레이트를 지닌 실린더 10개에 대해 수명 시험을 진행하였고, 결과는 다음과 같다.

- 1) 로드리스 실린더의 수명시험 중 발생한 고장

데이터를 바탕으로 고장 모드를 분석한 결과는 다음과 같다.

- 이종 재질(알루미늄+플라스틱) 이송 플레이트를 지닌 실린더는 관성 충격에 의한 이송 플레이트 파손의 현상이 발생된 것으로 분석되었으며, 이에 따라 이종 재질 플레이트는 관성 충격에 취약한 것으로 확인되었다.

2) 구성 재질에 의한 수명 확인을 위하여 시험 실린더의 고장 사이클을 기반으로 분석을 수행한 결과는 다음과 같다.

- 척도모수(η)에서는 알루미늄 이송 플레이트를 지닌 실린더가 이종 재질(알루미늄+플라스틱) 이송 플레이트를 지닌 실린더에 비해 2배 가량 높음을 확인하였다.

- 알루미늄 이송 플레이트를 지닌 실린더의 평균 수명(MTTF)이 이종 재질(알루미늄+플라스틱) 이송 플레이트를 지닌 실린더에 비해 5배 가까이 높게 추정되었다.

3) 성능 열화 확인 및 수명 분석에 필요한 모수를 도출하기 위하여 알루미늄 이송 플레이트를 지닌 실린더 10개에 대하여 완전 고장 데이터를 기반으로 수명 예측에 활용되는 모수 등을 도출하였다.

- 수명 분포를 확인하기 위하여 Anderson-Darling(A-D) 검정을 통해 분포 적합도를 확인한 결과 와이불(Weibull) 분포는 4.357으로 도출되어 로드리스 실린더의 수명 분포는 와이불(Weibull) 분포가 적합한 것으로 확인하였다.

- 완전 고장 데이터를 바탕으로 로드리스 실린더의 수명 예측에 활용하는 모수를 도출한 결과 형상 모수(β)는 4.07, 척도모수(η)는 1,560,044 사이클이며, 또한 MTTF(평균 수명)은 1,415,476 사이클, B_{10} 수명은 897,446 사이클로 확인하였다.

- 로드리스 실린더와 일반 공압 실린더의 수명을 비교한 결과 MTTF(평균 수명)은 일반 공압 실린더가 로드리스 실린더 비해 16배 이상으로 확인되었으며, B_{10} 수명은 일반 공압 실린더가 로드리스 실린더 비해 7배 이상으로 확인되었다.

References

- 1) Han, G. and Fu, Y., "Tri-stress Accelerated Life test for Cylinders," *Procedia Engineering*, Vol. 16, pp. 554-563, 2011.
- 2) Chen, J., Wang, D. Y., Fu, Y. L., and Qi, X. Y., "Double-CrossedStep-Stress Accelerated Life Testing for Pneumatic Cylinder," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 121-126, pp. 1274-1278, 2012.
- 3) Chen, J., Wu, Q., Bai, G., Ma, J., and Wang, Z., "Accelerated Life Testing Design Based on Wear Failure Mechanism for Pneumatic Cylinder," *Proc. of Accelerated life testing design based on wear failure mechanism for pneumatic cylinders*, pp. 1280-1285, 2009.
- 4) Kang, B. S., Cho, Y. H., 2012, "A Study on Comparison of Estimated Lifetime by Life Test and Accelerated Life Test with Temperature or Pressure for Pneumatic Cylinder", *KSME Spring Conference*, pp. 525~529
- 5) International Standard ISO, 2007, "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing - Part 3: Cylinders with piston rod," *International Standard ISO 19973-3*
- 6) Korean Standards KS, 2003, "Pneumatic rodless cylinder" *Korean Standards KS B 6518*
- 7) Japanese Industrial Standards JIS, 2002, "Fluid power systems and components - Inspection and test of cylinders - Part 1: Acceptance tests for pneumatic cylinders" *Japanese Industrial Standards JIS B 8377-1*
- 8) Kang, B. S., Kim, H. E., Cho, Y. H., Lee, C. S., 2010, "A Study on Accelerated Model of Pneumatic Cylinder Considering Pressure", *KSME Autumn Conference*, pp. 2031~2035
- 9) Seo, S. K., 2006, *MINITAB Reliability Analysis*, ERETEC, pp. 113~124.