

공기압 실린더 신뢰성 동향 및 평가절차 Reliability Evaluation Technology for Pneumatic Cylinder

강보식 · 이용범
B. S. Kang and Y. B. Lee

1. 서론

공기압 시스템의 핵심부품인 공압 액추에이터는 공장자동화 기계 및 산업기계, 식품기계, 반도체 공정라인 등 다양한 산업분야에서 핵심 구성요소로 널리 사용되고 있으며, 고장이 발생하면 전체 시스템에 막대한 손실을 야기 시킬 수 있는 부품으로 성능 열화없이 요구된 수명을 보장 할 수 있도록 신뢰성 평가 및 검증이 매우 필요한 제품이다.

또한 최근에 산업현장에서는 실린더의 제어성능 향상과 함께 내구성이 더욱 강화된 실린더의 요구가 급증하여 신뢰성에 대한 연구의 중요성이 크게 대두되고 있는 상황이다.

그러나 공기압 실린더와 관련된 기존 연구의 대부분은 동특성해석, 구동속도 등 시스템 제어관점에서의 연구가 주를 이루고 있으며, 실린더의 수명예측 및 신뢰성 개선을 위한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

현재 공기압 실린더의 신뢰성 연구는 고 신뢰성, 장수명화 기술개발 노력이 진행되고 있는 추세에 따라, 제품 보증 기간 내에 고장없이 요구된 작동 및 성능을 발휘하거나, 특정 사용 환경하에서 부품의 신뢰수준을 예측할 수 있는 평가절차 연구, 시간과 비용을 축소시켜 주는 가속시험에 대한 관심이 집중되고 있다.

따라서 본 해설에서는 공기압 실린더의 신뢰성 평가절차 및 가속시험 기술에 대하여 소개하고자 한다.

2. 공기압 실린더의 신뢰성 동향

최근 자동화 기구 등 다양한 생산 설비 요소 장치로 공기압 시스템은 비용적 측면과 안전성 측면에서 자동화 라인 등 산업현장에 폭넓게 사용되고 있으며, 그 적용범위 또한 점차 확대되고 있다.

공기압 시스템 요소부품의 고장 발생시 라인 정지 등 제품생산에 영향을 미쳐 막대한 손실이 발생하므로, 고장이 발생하기 전에 미리 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하여야 하는 등 수명과 관련된 신뢰성 연구가 매우 중요하다.

이와 관련하여 공압 실린더에 대한 기존의 연구를 주요 요소별로 살펴보면, 공기압 실린더 시스템의 온도변화 및 열전달에 관한 연구, 실린더 압력과 속도의 동특성에 관한 연구, 위치제어에 관한 연구 등이 대부분이었으며, 이 밖에 실린더 피스톤부 탄성체 쉘의 형상에 대한 연구, 실린더 구동시 강성(Stiffness)과 힘(Force) 제어, 충격 완화를 위한 가변 오리피스에 대한 특성 해석 연구와 실린더의 서보제어 시스템 온도변화 및 제어 특성 규명에 관한 많은 연구가 진행되었지만, 이들 연구의 대부분은 공기압 실린더의 특성해석 및 성능 향상을 위한 주요 인자(Factor) 규명, 속도제어 및 시스템 제어 향상을 위한 연구 등에 관한 연구로 수명예측과 신뢰성 연구에 해당되는 것은 거의 찾아 볼 수 없다.

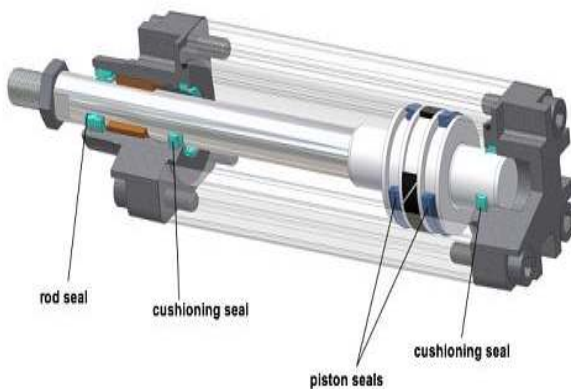


그림 1 공기압실린더 구조

표 1 공기압실린더분야 ISO 신뢰성연구동향

ISO 19973 -1	Pneumatic fluid power Assessment of component reliability by testing Part 1 : General procedures
ISO 19973 -2	Pneumatic fluid power Assessment of component reliability by testing Part 2 : Valves
ISO 19973 -3	Pneumatic fluid power Assessment of component reliability by testing Part 3 : Cylinders with piston rod
ISO 19973 -4	Pneumatic fluid power Assessment of component reliability by testing Part 4 : Pressure regulators

그러나 현재까지 이들 공기압 시스템용 부품에 대한 수명예측 및 신뢰성 분석을 수행하기 위하여 요구되는 주요 인자인 형상모수 등의 신뢰성 통계자료, 신뢰성 개선을 위한 데이터 확보와 분석은 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다.

이에 따라 ISO/TC 131을 중심으로 공기압 부품의 신뢰성 평가 관련 국제규격을 제정하기 위해 최근 미국, 일본 등 선진국의 주요 메이커 및 전문가를 중심으로 활발한 논의가 진행 중에 있다.

3. 공기압 실린더의 신뢰성 분석절차

공기압 제품의 제조자들은 산업현장 고객들의 신뢰성에 대한 요구를 만족 시키기 위해서는 시험대상품의 명확한 사용 조건(압력, 속도, 온도, 수명)들 내에서 제품들이 다다를 수 있는 신뢰성의 수준을 보장할 수 있는가를 고려하여야 한다.

이와 관련하여 공기압 실린더의 신뢰성분석은 크게 6개의 단계로 나누어 진행할 수 있으며, 분석 대상품의 고장모드 및 사용환경, 부품에 인가되는 스트레스 분석을 명확히 하여야 하며, 이때 고장모드의 영향 및 위험도 분석도 병행하여 실시하고, 평가접근 방법 및 시험조건 등을 결정하여야 한다,

이를 통하여 대상품의 수명평가를 실시하고 이때의 성능 열화 데이터를 수집하고, 확률지 분석, 수명 분포의 적합성 등 확보된 수명의 데이터 분석을 수행하여 수명분포의 모수 등 신뢰성 척도를 추정하는 절차로 진행한다.

그림 2는 단계별 신뢰성 분석절차 및 세부 분석방법을 정리한 6단계 절차를 나타내었다.

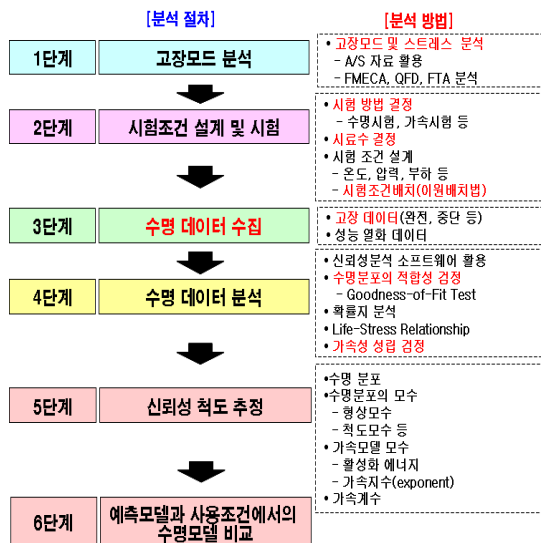


그림 2 신뢰성 분석 6단계 절차

3.1 신뢰성 시험조건 설계 및 시험

신뢰성 시험조건 설계에 있어 가장 중요한 부분은 시험평가 방법 결정과 샘플 수의 결정, 이원배치법을 통한 시험조건 결정이다. 이는 시험결과와 신뢰성을 증대시키나, 시료의 가격과 비용, 평가시간, 정확한 고장 데이터 확보 결정에 있어 매우 중요하며, 이의 결정시 시험의 정확성을 고려하여 선택하여야 한다.

이와 관련하여 신뢰성 시험의 특성수명 추정의 정확도를 보증하기 위한 시료수 결정은 매우 중요하며, 공기압 실린더의 경우 ISO 19973-1에서 시험 샘플수를 아래 표 2과 같이 7개 이상의 샘플수를 선정하여 시험 할 것을 요구하고 있다.

표 2 공기압실린더 시험 샘플수와 최소 고장 수

Sample Size	7	8	9	10	Over 10
Minimum number of failure	5	6	7	7	Over 70% of sample size



그림 3 신뢰성 시험조건 재현 평가장비

또한 이원배치법 등을 통하여 결정된 시험조건을 재현할 수 있는 공기압 실린더 평가장비 구성은 그림 3과 같이 압력과 부하, 속도, 작동에러를 검출할 수 있는 기능을 장착하고 있어야 한다.

또한 공기압 실린더의 시험조건 및 수명시험, 성능 측정에 대한 객관성 확보를 위하여, 부하물 설치 등의 시험조건과 및 수명시험에 대하여는 ISO/TC 131, 공기압 실린더의 수명 및 성능 평가를 위한 시험기준으로 JIS 규격을 적용될 수 있도록 구성되어야 한다.

와이블 확률지에서 고장데이터를 B_{10} 수명보다 아

래에 위치시켜 B_{10} 수명 추정의 정확성을 향상시키기 위해서는 그림 4에 나타난 바와 같이 7개 이상의 고장을 관측하여야 한다.

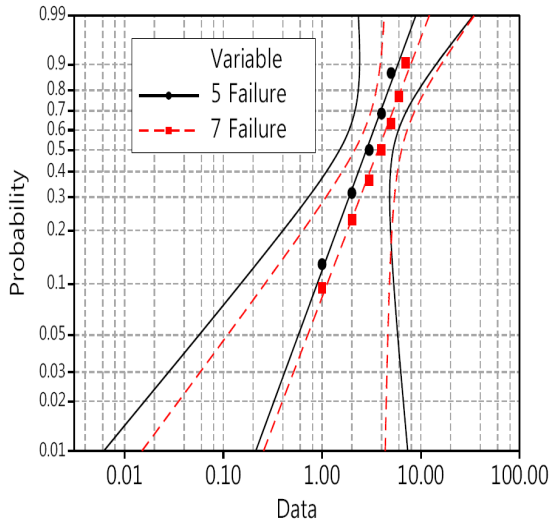


그림 4 B_{10} 수명 추정을 위한최소고장 관측

3.2 수명데이터 분석기술

신뢰성에서의 수명은 수리 불가능한 아이템이 고장이 발생할 때까지의 기간 또는 수리 가능한 아이템이 더 이상 수리할 수 없는 고장이 발생할 때까지의 기간을 말하며, 수명은 확정적으로 미리 정해지는 값이 아니라 사용 환경, 사용자, 사용방법 등에 의하여 달라지는 불확실성을 내포하고 있으므로 확률변수 정의된다.

공기압 실린더의 수명시험으로 획득된 데이터를 분석하기 위해서는 적합한 수명분포의 적합도를 분석하여야 하며, 와이블(Weibull) 분포, 대수정규(Lognormal) 분포, 지수(Exponential) 및 정규(Normal) 분포 중 획득 데이터가 어느 신뢰성 모형에 적합한지를 분석하여야 한다.

분포의 적합성을 나타내는 척도로 상관계수(correlation coefficient)값을 사용하며, 상관계수 값은 관측된 수명 데이터가 어떤 분포에 가장 적합한지를 판단할 수 있는 정보를 제공하여 주며 동일한 수명데이터를 다수의 분포에 적용하였을 경우, 상관계수 값이 1에 가까울수록 해당 분포에 적합함을 의미한다.

대표적인 수명분포에 대한 적합성 검정(goodness-of-fit test) 결과를 그림 5에 나타내었다. 공기압 실린더의 수명분포는 와이블 분포에 적합함을 알 수 있다. 또한 각각의 수명데이터의 동일성 검정을 수행

한 결과 P-Value 값이 유의수준 0.05보다 큰 0.882값을 가지므로 형상모수가 동일하다고 볼 수 있으며, 와이블 확률지 도시결과를 그림 6에 나타내었다

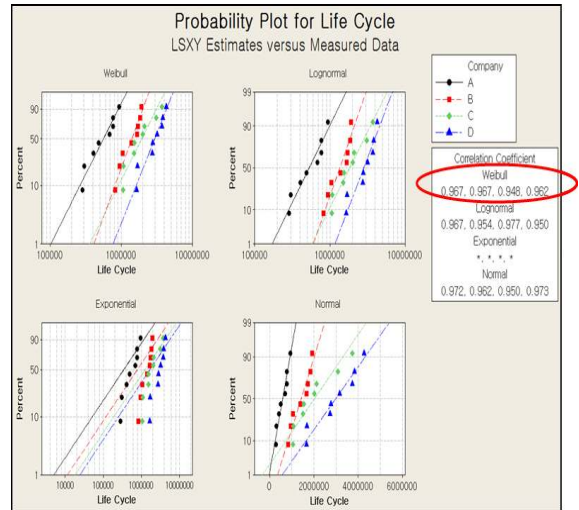


그림 5 공기압 실린더 수명데이터 분포의 적합도 분석

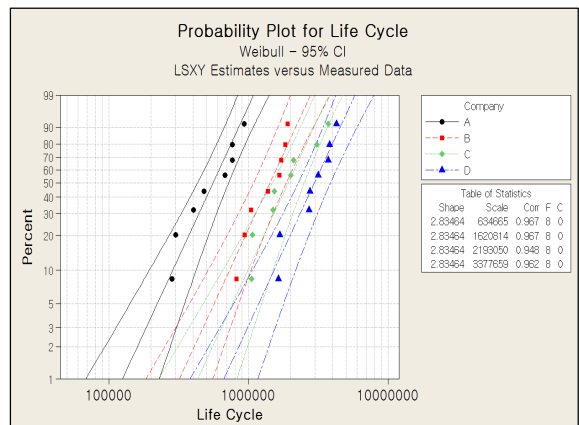


그림 6 공기압 실린더 형상모수의 동일성 검정

4. 공기압 실린더의 가속수명시험 및 평가절차

가속시험 평가기술은 평가 대상 부품들의 반응에 대한 보편적 법칙들을 정립시키면서 신뢰성 실험들의 시간과 비용을 축소시켜 주며, 수명시간 관찰에 필요한 기간을 축소시키기 위하여 시험조건들의 범위가 정상적 사용 조건들 이상에서 결정되는 시험이다.

시험평가 대상품을 실제 정상조건과 시간에 맞추어 시험할 경우 많은 비용과 인력과 긴 시간이 소모되므로, 정상조건 수명시험시간 보다 가혹한 조건에서 수명시험을 하여 시험시간을 단축하는 가속화 수명시험이 필요하다. 하지만 잘못된 가속인자를 통한 시험조건을 인가하면 올바른 수명 검증이 어려워

진다.

가속시험은 동일 아이템에 동일한 스트레스를 인가하더라도 스트레스의 수준에 따라 서로 다른 형태의 고장메커니즘이 발생할 수 있으며, 스트레스를 가혹하게 인가하더라도 고장메커니즘이 변하지 않고 실사용 조건에서 발생하는 동일한 고장 메커니즘을 재현하는 것이다.

시험 대상물에서 여러개의 고장 메커니즘들이 존재 할 수 있지만 고장분석을 통하여, 가속 수명시험에서 가속시킬 단일 고장메커니즘을 선정을 통한 스트레스 인자를 결정하고, 선정된 고장 메커니즘을 가속할 수 있는 스트레스 수준을 결정한다. 이때 고장물리 이론에 근거하거나 또는 가속수명시험에 대한 기존의 연구결과를 조사하여 스트레스를 결정한다. 가속 스트레스의 범위는 통상 동작한계(operating limit)와 일치하여야 한다.

가속시험에 의한 예측모델과 사용조건에서의 수명 모델을 비교하는 평가절차를 그림 7에 나타내었다.

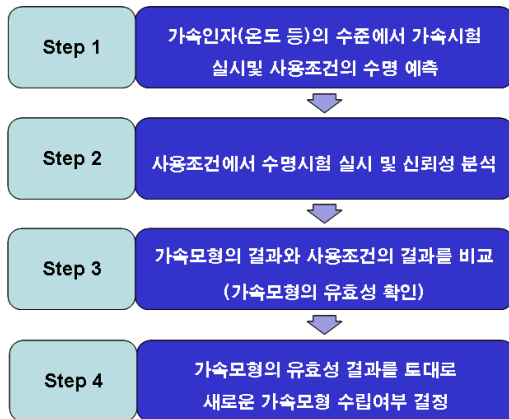


그림 7 가속모형의 유효성 평가절차

가속 스트레스 수준을 선정하거나, 여러 스트레스의 수준들을 조합하여 시험조건을 결정할 때 각 스트레스별로 2-3개의 수준을 선정하는 것이 일반적이며, 2개 이상의 스트레스의 수준들을 조합할 때는 직교배열표를 활용하여 시험조건을 수를 최소화 할 수 있도록 하여야 한다.

표 3 이원배치법을 이용한 수명시험조건 설계

Factor	Pressure(MPa)			
	Level	0.63	0.8	1.2
Load (kg)	1.9	1 st step	1 st step	1 st step
	5	1 st step	2 nd step	2 nd step
	10	1 st step	2 nd step	2 nd step

4.1 가속수명 시험방법 분석 절차

가속수명 시험방법은 크게 연구적 차원의 접근방법과 현실적 차원의 접근방법으로 크게 대별하여 고려되어 질 수 있다. 연구적 차원의 가속수명시험은 크게 3단계로 분석할 수 있으며, 1단계로는 공기압 실린더의 현장 사용조건 분석과 주고장모드 도출을 통하여 평가 대상품의 고장모드에 크게 영향을 주는 인자를 결정하고, 결정된 가속인자에 대한 가속수준의 결정 검증과 가속인자가 수명에 어떤 영향을 주는지에 대한 검증을 하여, Weibull Plot를 통한 가속관계 성립 즉 형상모수의 동일성을 검토하고 가속인자에 대한 가속모델 및 모수를 도출한다. 이때 가속모델의 분석은 수학적 분석방법과 도시적 분석방법이 있으며, 수학적 분석방법은 각각의 가속 조건에 대한 수명분석과 가속지수 및 활성화에너지에 대한 연립방정식을 도출하여 최소자승법을 이용한 최적 n과 E_A값을 추정한다.

2단계로는 1단계에서 도출한 2개의 가속인자를 이용하여 복합가속 모델을 도출하고 마지막 3단계에서는 도출된 가속모델의 유효성 검증을 위하여, 최대 가속조건에서의 수명데이터 분석과 본 단계에서의 복합가속모델의 도출 결과와 비교 검토를 수행하여 유효성을 검증한다.



그림 8 공기압 실린더 가속시험 평가장비

4.2 가속수명 시험장비

공기압 실린더 수명평가 시험장비는 실린더의 성능열화를 확인 할 수 있도록 압력 및 부하, 속도 등을 변화시켜 수명 시험을 할 수 있도록 구성 하여야 하며, 시험 대상품의 수명시험중 오작동과 작동시간

에러를 자동 검출할 수 있도록 입구와 출구단의 차압을 인지 할 수 있는 압력 스위치를 설치하여 고장 및 에러 원인 규명을 명확히 할 수 있도록 구성되어야 연속적인 가속수명 시험시 발생할 수 있는 정확한 데이터를 확보 할 수 있다.

복합가속을 재현할 수 있는 복합환경 시험장비는 그림 8과 같이 공기압실린더의 최대환경 사용조건을 고려한 온도 스트레스를 재현할 수 있어야 하며, 이때 공기압 실린더에 공급되는 압력 또한 최대 압력을 공급할 수 있는 시험회로 구성이 이루어져야 한다.

4.3 공기압 실린더 복합(부하-압력) 가속수명 절차

1) 가속성 성립

수명분포의 적합성과 시험조건 사이의 가속성을 검증하는 것이 필요하다. 수명분포의 적합성은 확률용지위에 타점된 고장시간 데이터들이 직선에 가깝게 놓여 있는지 여부로 판정할 수 있다.

가속성은 확률용지 위에 표시된 각 시험조건에의 회귀선이 평행한지 여부로 판정할 수 있으며, 가속성 성립분석 확인 방법은 각 시험조건에서의 수명데이터 고장모드가 동일한지, 각 시험조건의 수명데이터 분석결과 와이블 분포의 형상모수가 동일 즉 와이블 확률지의 수명데이터 타점결과 기울기가 유사한지를 분석하여야 한다. 이때 형상모수의 동일성은 P-Value 값이 0.1보다 크면 동일하다고 볼 수 있다.

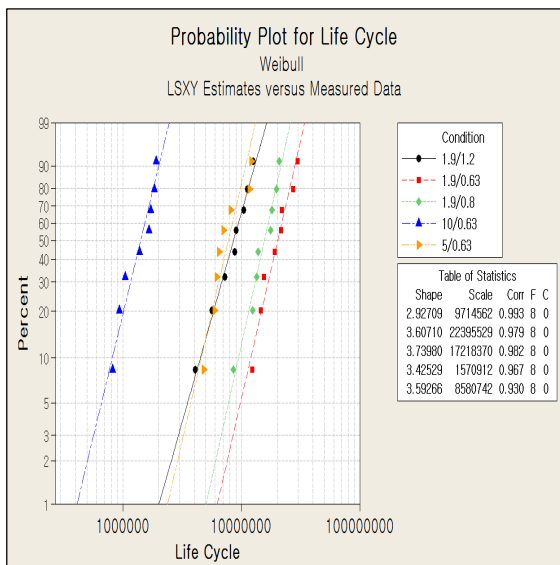


그림 9 가속 시험 데이터 분석(부하-압력)

그림 9는 공기압 실린더의 사용부하와 작동압력을 가속인자로 결정하고, 가속수명시험 조건은 이원배치

법을 이용하여 시험한 데이터를 분석한 결과를 나타내었으며, P-Value 값이 0.99로 유의수준 0.1보다 큰 값을 가지므로 각 시험조건에서의 형상모수가 동일하고 가속성이 성립함을 알 수 있다.

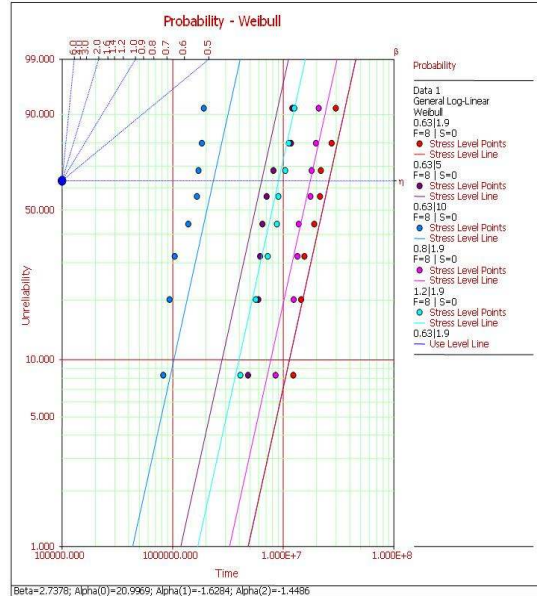


그림 10 복합가속 조건에서의 확률

2) 가속모델 모수 분석

상기의 가속성 성립 분석결과, 가속성이 성립함으로 ALTA 신뢰성 소프트웨어를 이용하여 공기압 실린더의 형상모수 $\beta = 2.74$ 를 도출됨을 확인하였고, 각 시험조건의 Weibull 확률지 분석결과를 그림 10에 나타내었다.

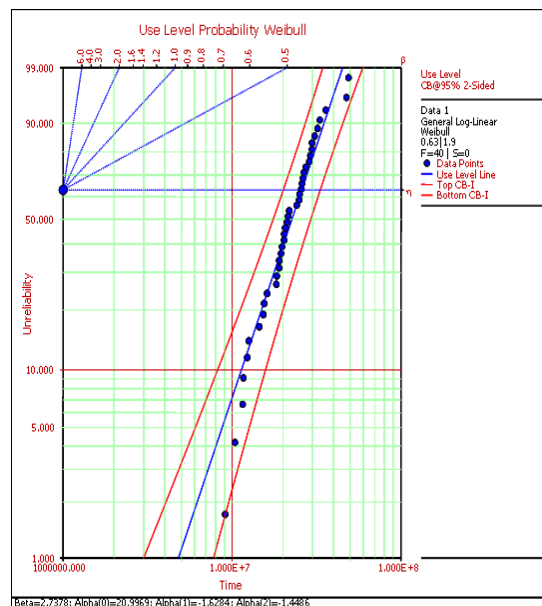


그림 11 복합가속 조건에서의 확률

3) 사용수준의 수명 및 가속계수 도출

수명-스트레스 모형을 통하여 각각의 시험조건에서의 시험데이터를 사용조건으로 변환하고 사용조건에서의 수명예측 및 가속계수를 도출한다. 그림 11에 나타낸바와 같이 실린더 수명의 형상모수가 2.73인 와이블 분포를 따름을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 공기압실린더의 신뢰성 평가기법 및 가속수명 평가 절차에 대하여 살펴보았으며, 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 공기압실린더의 성능열화 및 고장모드, 확률지 분석, 수명분포의 적합성 등 필드에서 수집되는 데이터를 신뢰성적인 측면에서 분석할 수 있는 방법과 절차를 체계적으로 제시 하였다.

2) 수명시험으로 확보된 데이터의 분포 적합도 분석결과, 공기압 실린더의 수명분포는 와이블 분포에 적합함을 알 수 있었다.

3) 실린더의 수명에 큰 영향을 미치는 이송부하와 작동압력을 가속인자로 결정하여 가속수명 시험한 결과, 공기압 실린더의 형상 모수를 도출할 수 있게 되었다.

4) 공기압실린더의 가속수명시험을 통하여, 수명분포 추정과 동일성 검정을 완료하였으며, 사용조건에서의 형상모수 및 척도모수가 통계적으로 차이가 없음을 확인하였다.

참고 문헌

1) 김윤광 외 13인, "신뢰성 용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, 2005.

2) ReliaSoft Corporation, "Accelerated Life Testing Reference", ReliaSoft Publishing, 2007.
 3) "Pneumatic fluid power - Cylinders - Final examination and acceptance criteria," ISO 10099, 2001.
 4) Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing General procedures", ISO/FDIS 19973-1, 2006.
 5) "Pneumatic fluid power - Pneumatic cylinders," JIS B 8368, 1999.
 6) Reliasoft, "Accelerated life testing reference", ALTA Version 6, 2001.

[저자 소개]

강 보 식(책임저자)



E-mail : kbs668@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7156
 1962년 8월 31일생.

2009년 한양대학교 정밀기계공학과 박사.
 1990년 한국기계연구원 입사, 현재 시스템 신뢰성연구실 실장. 공압기기 연구개발 및 기계류 부품 신뢰성분석 및 평가 수행. 유공압시스템학회, 대한기계학회 등의 회원.

이 용 범



E-mail : lyb662@kimm.re.kr
 Tel : 042-868-7151
 1959년 4월 3일생

2006년 충남대학교 대학원 열유체 전공 박사. 2008년 충남대학교 대학원 겸임교수로 재직 중. 1987년 한국기계연구원 입사, 현재 유압기기 및 시스템 설계, 신뢰성 분야 연구