

공기압 액추에이터의 신뢰성평가 기술

강보식, 성백주 한국기계연구원

[요약문]

공기압 액추에이터는 자동화 생산라인 등의 다양한 산업분야에서 사용되고 있으며, 고장이 발생하면 전체 시스템에 막대한 손실을 야기 시킬 수 있는 부품이다. 그러나 기존 공기압 액추에이터에 대한 연구는 설계 관점에서의 연구나 특성해석 및 구동속도 등의 제어관점에서의 연구가 대부분이었으며, 실린더의 수명과 신뢰성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않았다.

이와 관련하여 최근 공기압 액추에이터의 신뢰성에 대한 중요성 및 소비자의 요구수준이 날로 증대되고 있으며, 최근 공기압 액추에이터의 수명분포 데이터를 분석과 가속수명시험 실시를 통한 수명분포 추정과 형상모수의 동일성 검정, 제안한 복합가속 수명시험 모델에 대한 유용성 검증 등의 연구와 ISO를 중심으로 규격화를 위한 활동이 활발히 진행되고 있다

따라서 공기압 액추에이터에 대한 신뢰성 평가기법 및 가속수명 시험평가 기술에 대한 기술적 접근법을 소개하고자 한다.

1. 서 론

공기압 액추에이터는 자동화 생산라인 등의 다양한 산업분야에서 사용되고 있으며, 고장이 발생하면 전체 시스템에 막대한 손실을 야기 시킬 수 있는 부품으로 신뢰성 평가 및 검증이 매우 필요한 액추에이터이다.

그러나 공기압 액추에이터와 관련된 기존 연구의 대부분은 설계 관점에서의 연구와 특성해석, 구동속도 등의 제어 관점에서의 연구가 주를 이루고 있으며, 액추에이터의 수명과 신뢰성에 대한 연구는 거의 이루어지지 않고 있다.

액추에이터에 대한 기존의 연구를 주요 요소별로 살펴보면, 공기압 액추에이터(Actuator)의 Vehicle Dynamic 응용해석 연구, 공기압 액추에이터 시스템의 온도변화 및 열전달에 관한 연구, 공기압 액추에이터의 슬라이딩 모드에서의 위치제어에 관한 연구 등이 대부분이었으며, 이 밖에 Double-acting 액추에이터 구동시 초크밸브(Chock Valve) 유량을 조절하여 발생하는 Stiffness와 Force 제어, 공기압 액추에이터 피스톤부에 내부 누설방지를 위해 설치되는 탄성체 씬의 마찰력 감소를 위한 새로운 씬 형상에 대한 연구, 공기압 작동시 충격 완화를 위한 댐퍼의 가변 오리피스에 대한 특성 해석 연구와 공기압 액추에이터의 서보제어 시스템 온도변화 및 제어 특성 규명에 관한 많은 연구가 진행되었지만, 이들 연구는 공기압 액추에이터의 특성해석 및 성능 향상을 위한 주요 Factor 규명, 액추에이터 행정 끝단의 충격 완화를 위한 쿠션 구조 등 설계의 개선, 속도제어 및 시스템 제어 향상 등에 관한 연구로 수명 예측과 신뢰성 연구에 해당되는 것은 거의 찾아 볼 수 없다.

최근 공기압 액추에이터의 신뢰성 연구는 고속화 및 소형화, 고 신뢰성, 장수명화 기술개발 노력이 진행되고 있는 추세에 따라, 수명 및 주요성능 시험을 통하여 제품 보증 기간 내에 고장없이 요구된 작동 및 성능을 발휘 할 수 있도록 연구하거나, 특정 사용 환경하에서 부품의 신뢰수준을 예측할 수 있는 연구를 위한 관심이 집중되고 있다.

따라서 본고에서는 최근 ISO Technical Committee 등에서 신뢰성 평가기술 정립을 위해 활발히 진행되고 있는

공기압 액추에이터에 대한 신뢰성 평가방법 및 가속수명에 대한 기술적 접근법을 소개하고자 한다.

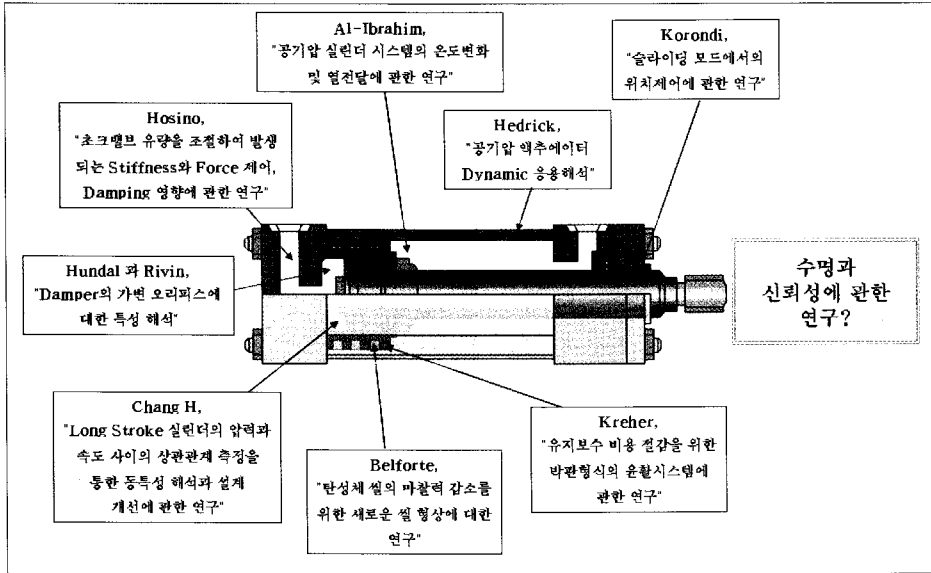


그림 1. 공기압액추에이터 연구동향

2. 공기압 시스템의 최근 신뢰성 활동

최근 자동화 기구 등 다양한 생산 설비 요소 장치로 공기압 시스템은 비용적 측면과 안전성 측면에서 산업현장에 폭넓게 사용되고 있고, 그 적용범위가 점차 확대되고 있다. 만약 자동화 라인의 특성상, 공기압 시스템 요소부품인 액추에이터의 고장이 발생할 경우에는 생산 중단 등으로 인하여 막대한 손실이 발생하므로 고장이 발생하기 전에 미리 관련 부품의 수명을 예측하여 부품을 교체하여야 한다.

그러나 현재까지 이들 공기압 시스템용 부품에 대한 수명예측 및 신뢰성 분석을 수행하기 위하여 요구되는 형상 모수 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.

표 1. 공기압 액추에이터분야 ISO 신뢰성 연구동향

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

표 2. 유압 액추에이터분야 ISO 신뢰성 연구동향

ISO 19972-1	Hydraulic fluid power – Methods to assess the reliability of hydraulic components Part 1 : General procedures and calculation method
ISO 10771-2	Hydraulic fluid power – Fatigue pressure testing of metal pressure containing envelopes Part 2 : Pressure Rating method

3. 공기압 액추에이터의 신뢰성 분석절차

공기압 액추에이터나 기타 요소부품의 신뢰성분석은 크게 5개의 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 수집하며, 확률지 분석, 수명분포의 적합성 등 확보된 수명의 데이터 분석을 수행하여 수명분포의 모수 등 신뢰성 척도를 추정하는 절차로 진행한다.

아래 그림 2는 단계별 신뢰성 분석절차 및 세부 분석방법을 나타내었다.

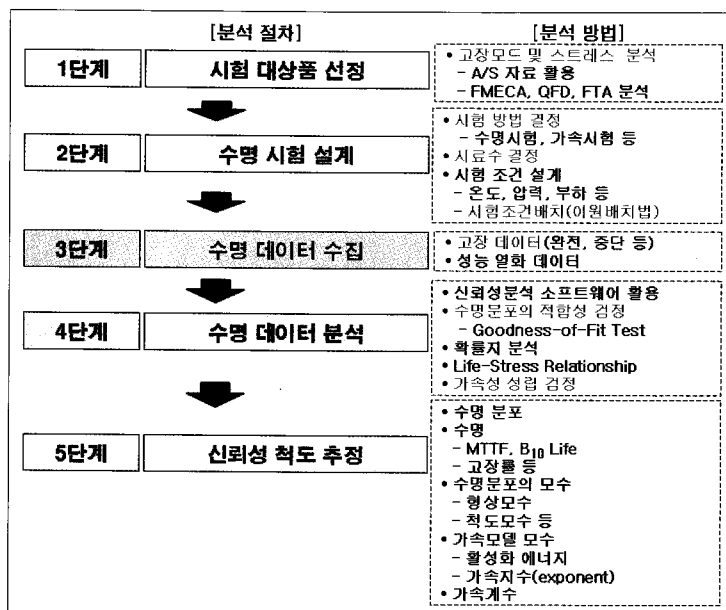


그림 2. 신뢰성분석 절차

3.1 신뢰성 시험을 위한 샘플 수 결정 및 고장 관측

신뢰성 시험에 있어서 샘플 수의 증가는 시험결과의 신뢰성을 증대시키나, 시험을 위한 비용과 시간 역시 증가한다. 따라서 신뢰성 시험과 정확한 고장 데이터를 확보하기 위한 시험 샘플의 개수 결정은 매우 중요하며, 이의 결정시 시험 비용과 시험의 정확성을 고려하여 적절하게 선택할 수 있어야 한다.

이와 관련하여 ISO 19973-1에서는 특성수명 추정의 정확도를 보증하기 위하여 공기압 액추에이터의 시험 샘플수를 아래 표 3과 같이 7개 이상의 샘플수를 선정하여 시험 할 것을 요구하고 있다.



또한, 와이블 확률지에서 고장데이터를 B_{10} 수명보다 아래에 위치시켜 B_{10} 수명 추정의 정확성을 향상시키기 위해서는 그림 3에 나타낸 바와 같이 7개 이상의 고장을 관측하여야 한다.

표 3. 공기압액추에이터 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

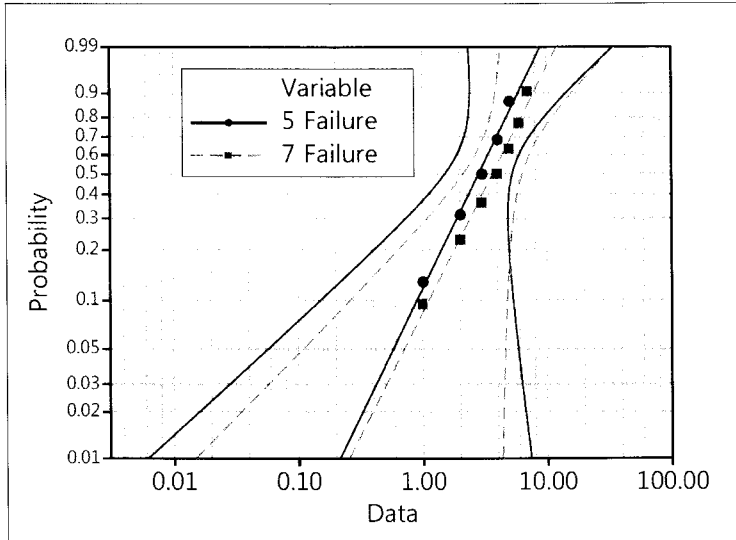


그림 3. B_{10} 수명 추정을 위한 최소고장 관측

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 확률변수로 정의된다.

공기압 액추에이터의 수명시험으로 획득된 데이터를 분석하기 위해서는 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 4에 나타내었다. 공기압 액추에이터의 수명분포는 와이블 분포에 적합함을 알 수 있다.

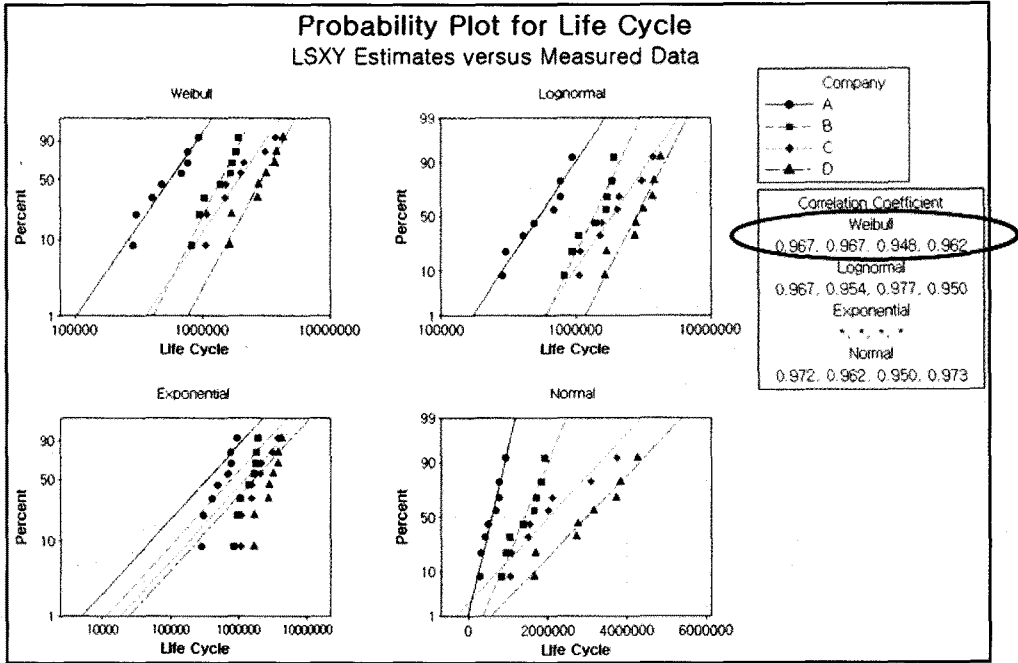


그림 4. 공기압 액추에이터 수명데이터 분포의 적합도 분석

4. 공기압 액추에이터의 가속시험 평가기술

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

가속시험은 동일 아이템에 동일한 스트레스를 인가하더라도 스트레스의 수준에 따라 서로 다른 형태의 고장메커

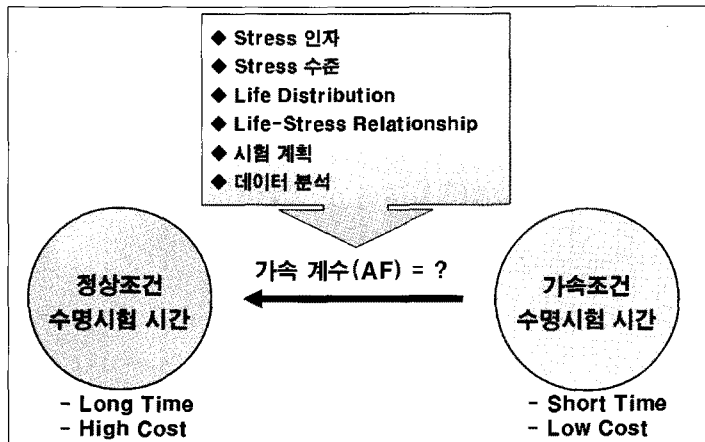


그림 5. 가속 수명시험 평가

니즘이 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 고장메커니즘 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.

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 시험조건의 수를 최소화 할 수 있도록 하여야 한다.

4.1 가속수명 시험방법

가속수명 시험방법은 그림 6과 같이 크게 연구적 차원의 접근방법과 현실적 차원의 접근방법으로 크게 대별하여 고려되어 질 수 있다. 연구적 차원의 가속수명시험은 크게 3단계로 분석할 수 있으며, 1단계로는 공기압 액추에이터의 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 EA값을 추정한다.

$$\ln(AF_i) = n \cdot \ln\left(\frac{P_{test}}{P_{field}}\right) + E_a \cdot \frac{1}{k} \left(\frac{1}{T_{field}} - \frac{1}{T_{test}} \right)$$

Known parameters: n , E_a , k
Unknown parameters: AF_i , P_{test} , P_{field} , T_{field} , T_{test}

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.

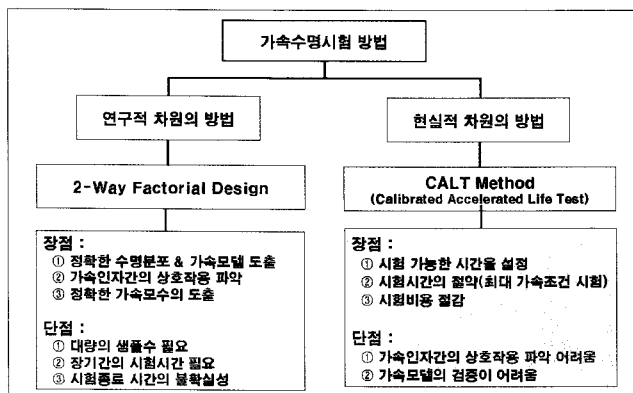


그림 6. 가속 수명시험 평가

4.2 가속수명 시험장비

공기압 액추에이터 수명평가 시험장비는 액추에이터의 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 검출 할 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. 또한 공기압 액추에이터의 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 구성되어져야 한다.

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



(a) 수명평가 장비



(b) 복합환경 가속시험장비

그림 7. 공기압 액추에이터 수명 및 가속시험 평가장비

4.3 공기압 액추에이터 복합(부하-압력) 가속수명

4.3.1 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 시험조건들의 회귀선이 평행한지 여부로 판정할 수 있으며, 가속성 성립분석 확인 방법은 각 시험조건에서의 수명데이터 고장모드가 동일한지, 각 시험조건들의 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 8은 공기압 액추에이터의 사용부하와 작동압력을 가속인자로 결정하고, 가속수명시험 조건은 이원배치법을 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.

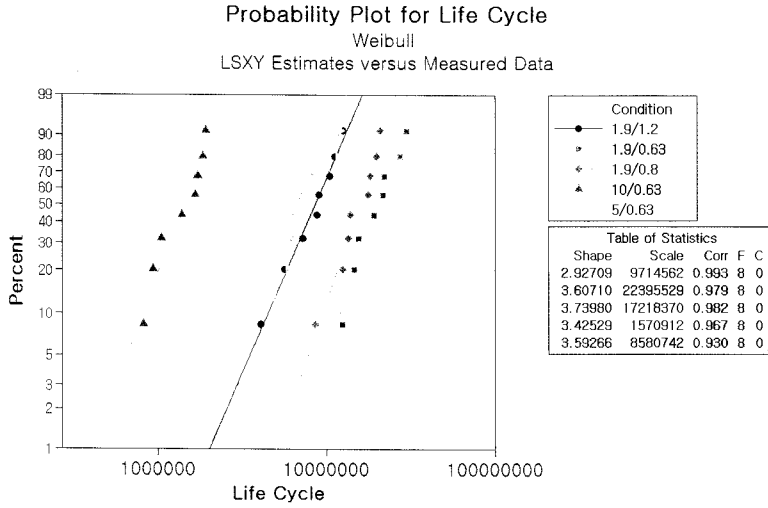


그림 8. 가속 시험 데이터 분석(부하-압력)

4.3.2 가속모델 모수 분석

상기의 가속성 성립 분석결과, 가속성이 성립하므로 ALTA 신뢰성 소프트웨어를 이용하여 공기압 액추에이터의 형상모수 $\beta = 2.74$ 가 도출됨을 확인하였고, 각 시험조건의 Weibull 확률지 분석결과는 그림 9와 같이 나타낼 수 있다.

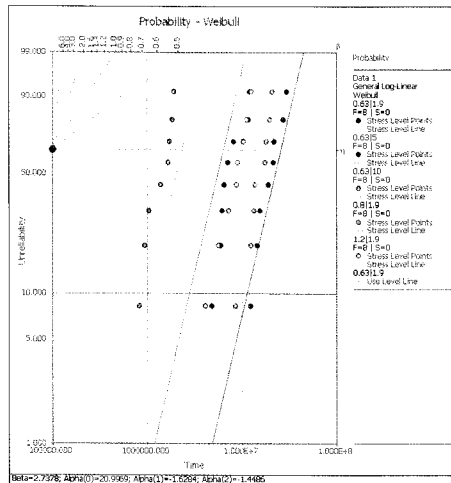


그림 9. 복합가속 조건에서의 확률분포

5. 결론

본 연구에서는 공기압액추에이터의 최근 연구동향 및 신뢰성평가기법, 가속수명 기술에 대하여 살펴보았으며, 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 산업현장에 폭넓게 사용되는 공기압 액추에이터의 신뢰성 분석 및 개선을 위한 활동은 최근 ISO/TC 131을 중심으로 해당분야의 신뢰성 국제규격을 제정하기 위한 활발한 논의가 진행되고 있음을 확인하였다.
- 2) 공기압액추에이터의 성능열화 및 고장모드, 확률지 분석, 수명분포의 적합성 등 필드에서 수집되는 데이터를 신뢰성적인 측면에서 체계적으로 분석할 수 있는 방법과 절차를 제시하였다.
- 3) 수명시험으로 확보된 데이터의 분포 적합도 분석결과, 공기압 액추에이터의 수명분포는 와이블 분포에 적합함을 확인하였다.
- 4) 액추에이터의 수명에 큰 영향을 미치는 부하와 작동압력을 가속인자로 결정하여 가속수명 시험한 결과, 공기압 액추에이터의 형상 모수는 $\beta = 2.74$ 로 도출됨을 확인하였다.

✻ 참고 문헌

- [1] 김윤광 외 13인, "신뢰성 용어 해설서", 산업자원부 기술표준원, 2005.
- [2] ReliaSoft Corporation, "Accelerated Life Testing Reference", ReliaSoft Publishing, 2007.
- [3] Anton H.Hehn, "Fluid Power Troubleshooting," 2nd Edition, Marcel Dekker Inc. 1981.
- [4] "Pneumatic fluid power - Cylinders - Final examination and acceptance criteria," ISO 10099, 2001.
- [5] "Pneumatic fluid power - Assessment of component reliability by testing? General procedures" ISO/FDIS 19973-1, 2006,
- [6] "Pneumatic fluid power --Pneumatic cylinders," JIS B 8368, 1999.
- [7] Reliasoft, "Accelerated life testing reference", ALTA Version 6, 2001.



강 보 식

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부
· 시스템신뢰성연구실 실장
· 관심분야 : 기계류부품 신뢰성분석, 유공압기기
· E-mail : kbs668@kimm.re.kr



성 백 주

· 한국기계연구원 시스템엔지니어링 연구본부
· 시스템신뢰성연구실 선임연구원
· 관심분야 : 기계류부품 신뢰성분석, 전자액추에이터
· E-mail : sbj682@kimm.re.kr