

테이프 피더 내장 공압 액추에이터에 대한 신뢰성 평가에 관한 연구

최진화*, 전병철⁺, 조명우⁺⁺, 강성민⁺⁺⁺, 이수진⁺⁺⁺

(논문접수일 2006. 3. 17, 심사완료일 2006. 4. 19)

A Study on the Reliability Analysis for the High Precision Pneumatic Actuator within Tape Feeder

Jin Hwa Choi*, Byung Cheol Jeon⁺, Myeong Woo Cho⁺⁺, Sung Min Kang⁺⁺⁺, Soo Jin Lee⁺⁺⁺

Abstract

This research presents the reliability analysis of the pneumatic actuator within the tape feeder that is used to transfer the correct force to linked parts during $1.0E+7$ cycles. First, the degradation analysis for thrust and air leakage is executed to obtain the failure data of a product based on its performance over time. Second, once the parameters has been calculated using the weibull 2-parameter distribution and MLE(Maximum Likelihood Estimation), information related to life such as reliability, failure rate, probability density function is estimated. Finally, MTTF(Mean Time To Failure) and B_{10} life of actuators are calculated. MTTF means the mean life at the confidence level and B_{10} life refers to the time by which 10% of the product would fail. In this study, failure causes and solutions are examined using the reliability analysis.

Key Words : Reliability analysis(신뢰성 분석), Pneumatic actuator(공압 액추에이터), Weibull distribution(와이블 분포), MTTF(평균고장수명), B_{10} life(B_{10} 수명)

1. 서론

테이프 피더는 저항, 콘덴서와 같은 표면실장부품(SMD:

Surface Mount Device)을 연속적으로 마운터(mounter)에 공급해주는 장치로서 최근에는 칩의 초소형화로 인하여 정밀도가 더욱 요구되는 소모성 부품으로 인식되고 있다⁽¹⁾. 이

* 인하대학교 산업과학기술연구소 (wantingy@lycos.co.kr)

주소: 402-751 인천시 남구 용현동 253

+ 인하대학교 산업과학기술연구소

++ 인하대학교 기계공학부

+++ (주)프로텍 부설연구소

러한 테이프 피더를 구성하는 요소부품들은 칩공급 메커니즘에 따라 형태, 크기, 위치가 각각 틀리지만 크게 구동부, 이송부, 권취부, 칩 부품을 담고 있는 테이프 릴 또는 카트리리지 장착부로 구성되어 있다. 구동부의 경우, 피더를 동작시키는 동력원으로서 공압, 전기, 기계식 등이 있으나 오늘날 제품화되고 있는 대부분의 테이프 피더가 공압 액추에이터를 채택하여 사용하고 있다.

본 연구에서는 ㈜프로텍의 자체 개발 제품인 직선이송 타입 테이프 피더에 내장되어 있는 공압 액추에이터에 대하여 신뢰성 평가를 수행하였다. 여기서 신뢰성이란 주어진 아이템의 성능을 나타낼 수 있는 지표로서 신뢰성분석을 통해 고장의 원인을 파악하거나 규명함으로써 이를 최소화하여 제품의 수명을 향상시키는 것을 일컫는다. 현재까지 신뢰성 분석은 전자부품의 고장사례에 대하여 실시한 경우가 대부분이며 기계 및 구조물의 파손사례 등에 관한 연구는 아직까지 미미하다⁽²⁻⁷⁾. 본 연구의 대상물인 내장형 공압 액추에이터의 경우, 반도체 공정에서 고정도의 반복 위치정밀도를 요하는 직선 이송형 테이프 피더의 동력원이며 약 1000만회 이상의 동작 후에도 일정한 추력과 내구성을 유지해야 하는 중요 부품이다. 따라서 정확한 성능 평가와 함께 발생 가능한 고장 유형을 분류하고 원인 분석을 수행함으로써 설계 또는 제조상의 결함을 방지하고 사용 중인 제품에 대해서 최소 수명을 보장하고자 하였다.

2. 데이터 분석

2.1 내장형 공압 액추에이터의 특징

분석에 사용된 공압 액추에이터는 Fig. 1에 나타난 것처럼 ㈜프로텍 자체 기술력으로 설계, 생산, 조립되었으며 직선 이송용 테이프 피더의 구동부에 장착되어 피더의 각 연결 링크들에 힘을 전달하는데 쓰인다. 특징으로는 Table 1에 나타난 바와 같이 고정도의 반복위치 정밀도 구현이 가능하며 9.3mm 슬림형으로 저 마찰, 무급유가 가능하다. 또한, 실린더의 단면 부위가 근사적으로 사각단면으로 구성되어 원형 방식에 비해 향상된 추력성능을 보인다. 구성요소 중 피스톤 패키징은 고속 및 내마모성 등이 우수한 U-Packing을 적용하여 공기누설(air leakage)을 최소화함으로써 공압의 저하로 인한 편 하중, 스틱-슬립(stick slip) 현상 등을 방지한다. 구성 요소들은 Fig. 2와 같다.

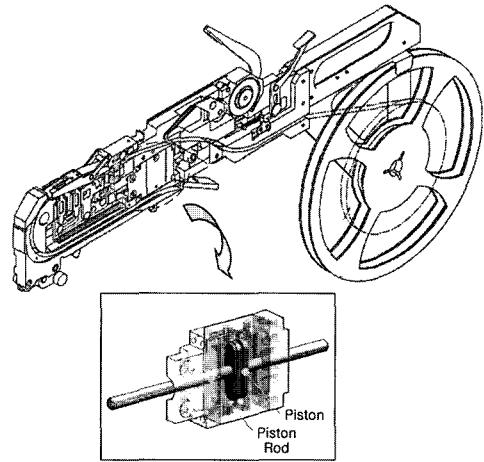


Fig. 1 The pneumatic actuator within tape feeder

Table 1 Specification of pneumatic actuator

No.	Contents	Unit	Spec.
1	Piston diameter	mm	Φ12
2	Stroke	mm	11
3	Max. piston velocity	m/s	0.35
4	Max. operating pressure	kgf/cm ²	7
5	Min. operating pressure	l/min	1.5
6	Internak pressure	-	0.01
7	Working type	-	Reciprocal
8	Packing type	-	U-packing
9	Seal property	-	NBR
10	Temperature	°C	-10~ +70
11	Life	km	90

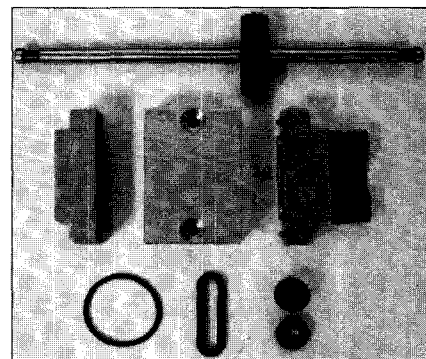


Fig. 2 Components of pneumatic actuator

2.2 데이터 수집 및 분석 방법

일반적인 신뢰성 분석 과정과 마찬가지로 본 연구에서는 실험 데이터와 외삽 데이터를 이용하여 부품별 고장 모드를 분류하고 고장원인을 추정하며 적합한 고장분포함수를 적용함으로써 모수를 추정하고 다양한 신뢰성 지표를 도출하는 과정을 수행하였다.

실험으로부터 사용한 데이터는 비교체(non-replaced) 시험 형태로 정시중단(time censored) 데이터를 이용하였다. Fig. 3과 같이 시험은 10여 개의 샘플을 무부하 상태에서 1cycle/sec 왕복운동으로 1500만회에 이르기까지 실시하였다. 이와 같은 시험이 수행되는 과정 중 일정 구간마다 제품의 양불 판정을 위해 내압성 시험(internal pressure test)와 공기누설 시험(air leakage test)을 각각 실시하였다. 내압성 시험은 무부하의 상태로 헤드쪽 및 로드쪽에서 최고 사용 압력의 1.5~2배인 5kgf/cm²의 공기압을 교대로 약 1분간 가압 유지한 후 추력을 측정하여 수행되었으며 공기누설 시험은 실린더를 정지 상태로 놓고 헤드쪽 및 로드쪽으로부터 0.03kgf/cm² 이상의 공기압을 교대로 가하여 누설량을 조사하는 것으로 이루어졌다. 수행되는 동안의 각 부의 이상 유무 또한 체크되었다. 앞서 언급한 것처럼, 이상의 시험으로 획득된 데이터에 외부사레 데이터를 종합하여 사용조건, 고장개수, 고장시간, 고장형태, 고장원인으로 정리하였다. 이후, 분석 작업으로 데이터 중 고장시간과 사용조건, 고장개수는 고장율과 평균고장시간을 예측하기 위해 사용하였으며 고장모드 혹은 고장 메커니즘 등은 고장의 원인을 규명하여 설계 변경 및 제조 시 보완자료로 활용할 수 있도록 하였다.

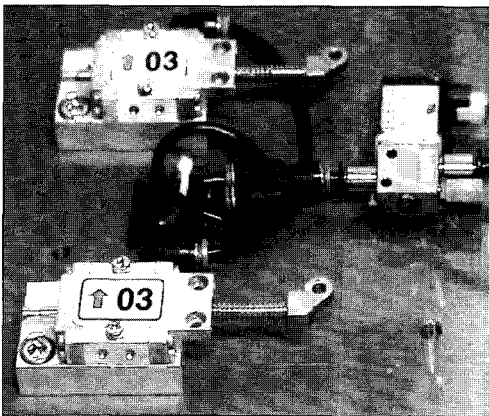


Fig. 3 Reliability test to obtain the failure of a product based on its performance over time

2.3 고장 확률 분포 함수

데이터를 이용한 제품의 고장률 추정 방법으로는 지수분포(exponential distribution), 와이블분포(weibull distribution), 정규분포(normal distribution), 대수정규분포(lognormal distribution)와 같은 고장분포함수를 사용하는 방법이 일반적이며 본 연구에서는 각종 베어링류, 클러치, 피스톤, 모터, 밸브류, 압력용기, 콤프레셔, 펌프 등을 포함한 기계류 부품의 수명 추정에 유용한 와이블 분포를 사용하였다⁽⁸⁾. 이 분포는 위치모수(location parameter, $\gamma=0$), 형상모수(shape parameter, β), 척도모수(scale parameter, η)의 3가지 모수에 의해서 결정되며 이들로 구성된 신뢰성(reliability, $R(t)$), 고장률(failure rate, $\lambda(t)$), 확률밀도함수(probability density function, $f(t)$)의 함수식들은 다음과 같다.

$$R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (1)$$

$$\lambda(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (2)$$

$$f(t) = \left(\frac{\beta}{\eta}\right)\left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (3)$$

이상의 와이블 모형과 부품에 대한 정시중단 자료를 이용하면 모수를 추정할 수 있는데 본 연구에서는 점추정(point estimation) 중 최우추정법(MLE: maximum likelihood estimation)을 사용하였다.

2.4 고장형태 분류

일반적으로 기계 부품류에 발생하는 고장 메커니즘으로는 단일 부하에 의하여 고장이 발생하는 우발 메커니즘과 시간의 경과에 따른 부하 축적으로 인한 마모 메커니즘으로 분류할 수 있다. 본 연구의 신뢰성 평가자료 중 외삽 데이터는 외부 사용 환경에서 테이프 피더에 내장된 공압 실린더를 1500만회 반복운동을 수행하면서 획득한 동작성능 데이터이다. 성능시험 중 고장판별은 규정된 위치 반복정밀도가 나

Table 2 Failure modes and causes

Type	Failure Mode	Source
Seal	Air Leakage	<ul style="list-style-type: none"> • Packing wear • Disproportionate • emphasis
Piston rod	Deflection	• Overload or overspeed
Piston	Crashing sound	• Piston packing wear

타나지 않을 경우, 또는 불규칙 동작을 수행하는 경우, 동작을 수행하지 않는 경우 모두를 고장으로 분류하였다. Table 2는 획득된 데이터 중 주요한 특징 고장형태를 분류한 것이다.

3. 신뢰성 분석

3.1 추력 데이터 분석

열화(degradation) 분석은 고장이 없거나 아주 적은 경우의 시험에 적용할 수 있는 방법 중의 하나이다. 많은 고장 메커니즘은 제품의 부분적인 열화와 직접적인 연관이 있으며, 열화 분석은 시간에 따른 열화 또는 성능의 측정값을 기반으로 해서 가정한 고장 시간을 외삽하여 예측할 수 있다. 본 연구에서는 시험으로 획득한 추력 데이터로 열화분석을 수행하였으며 추력 측정값이 2.0kgf/cm² 이하일 경우 정상적인 기능을 수행하지 못하고 열화된 것으로 판단하였다.

Table 3은 10개의 샘플에서 추정된 고장시간을 이용하여 모수추정을 수행한 결과이며 와이블의 각 함수식 (1), (2), (3)에 따른 데이터 분포는 Fig. 3과 같이 나타난다.

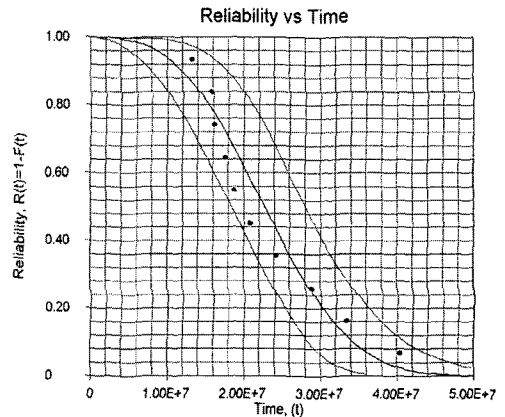
Fig. 4 (a)의 분석에 의하면 시간이 1.00E+7회에 이르면 0.9389 즉, 제품의 고장 발생 확률이 약 94% 정도임을 알 수 있다. 또한, Fig. 4 (b) 고장률 그래프와 Fig. 4 (c) 확률밀도함수 그래프에서 볼 수 있듯이 시간이 약 2.24E+7회에 이를 때까지 제품의 고장 발생 확률이 선형적으로 증가하다가 그 이후로 시간의 증가에 따라 고장 발생 빈도는 일정하게 줄어드는 양상을 보이고 있다. 90% 신뢰구간에서 추정된 제품의 평균수명(MTTF: Mean Time To Failure)은 2.2987E+7회, B₁₀ 수명은 1.1924E+7회로 각각 산출되었다. 여기서 B₁₀ 수명은 제품 중 10%가 고장을 일으키는 시점을 의미한다.

3.2 공기 누설 데이터 분석

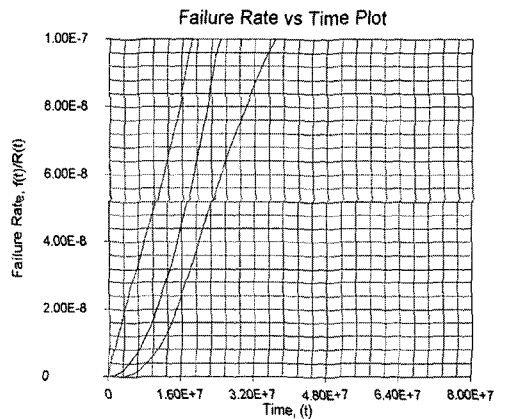
공기 누설의 주요 원인은 외삽 데이터 분석에서 나타난 바와 같이 씰(seal)의 마모로 인한 패킹 기능 상실이다. 일반적으로, 씰(seal) 재료로는 합성 고무제가 많이 사용되며 고무 배합 정도와 매체 종류에 따라 기계적 성질 및 사용온도, 투과성 등이 틀려진다. 대상 제품의 경우, 기계적 성질이 전

Table 3 Estimated parameters of Weibull(Thrust data)

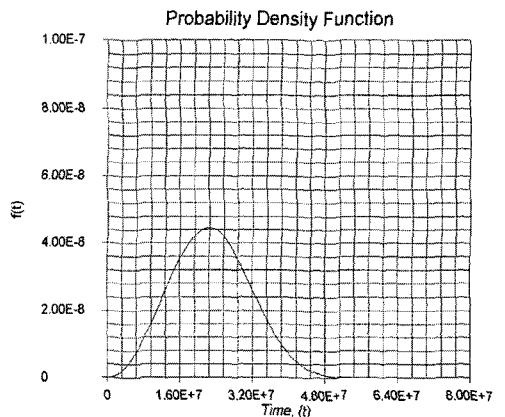
Parameters	Values
Scale(η)	2.5772E+7
Shape(β)	2.9198



(a) Reliability



(b) Failure rate



(c) Probability density function

Fig. 4 Weibull probability plot(Thrust data)

Table 4 Estimated parameters of Weibull(Air leakage data)

Parameters	Values
Scale(η)	1.4840E+7
Shape(β)	4.7691

체적으로 양호한 니트릴 고무가 사용되었으며 스퀴즈 패킹 (squeeze packing)방법에 비해 고속 및 내마모성이 우수한 입술모양의 U자형 패킹방법을 적용함으로써 공기누설을 최소화 하였다.

열화시험에 있어 공기 누설량이 0.03kgf/cm²을 초과할 경우 열화된 것으로 간주하여 고장데이터를 추정하였다.

Table 4는 추정된 와이블 확률분포의 모수를 나타내며 Fig. 5는 90% 신뢰구간(confidence interval)의 와이블 분포 결과를 나타내고 있다. Fig. 5 (a)에 나타난 분석결과에 의하면 약 1.00E+7회의 시간에 이르렀을 때 0.8588의 신뢰도 즉, 제품의 고장 발생 확률이 약 86% 정도임을 알 수 있다. 더불어 Fig. 5 (b) 고장률 그래프와 Fig. 5 (c) 확률밀도함수 그래프에서 1.40E+7회에 이를 때까지 고장 발생 확률이 일정하게 증가하는 경향을 보이며 그 시점 이후에는 시간에 따른 제품 고장빈도가 감소하는 것을 알 수 있다. 추정된 평균수명은 1.3588E+7회, B₁₀ 수명은 9.2575E+6회로 나타났다.

4. 결론

본 연구에서는 반도체 칩의 정밀 이송을 목적으로 하는 테이프 피더의 내장 공압 액추에이터에 대하여 신뢰성 평가를 수행하였다. 평가 방법으로는 내부 실험 데이터와 외삽 데이터로부터 고장유형을 분류하고 열화 측정값을 기반으로 고장시간을 예측하였으며 최우추정법, 2-모수 와이블 확률 분포를 사용하여 수명평가를 실시하였다. 내부 실험의 경우 10개의 동일한 시험편을 대상으로 1500만회에 이르기까지 구동하여 일정구간마다 추력과 공기누설을 측정하였다.

다음은 대상 공압 액추에이터에 대한 신뢰성 평가 결과를 나열한 것이다.

- (1) 테이프 피더용 내장 공압 액추에이터의 주된 고장원인 과 형태는 썬 마모로 인한 패킹불량 형태이며 이로 인해 공기 누설이 발생함을 알 수 있었다.
- (2) 두 가지 시험에 대한 분석 결과 중 추력 데이터로부터 추정 수명에 대한 신뢰지수보다 공기누설 데이터로부터

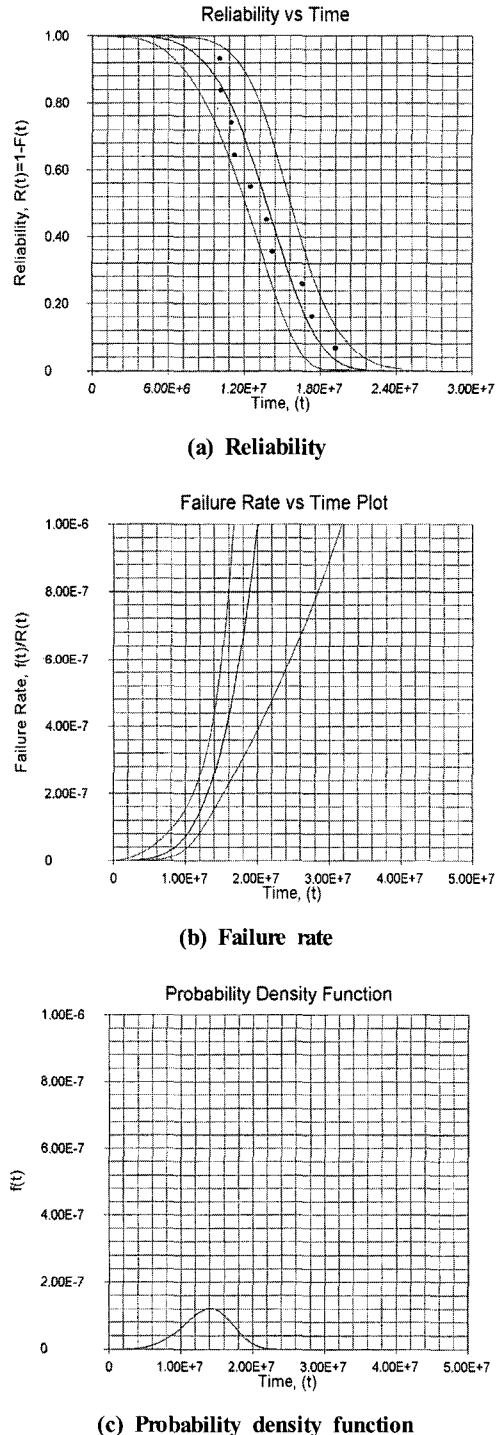


Fig. 5 Weibull probability plot(Air leakage data)

추정된 수명에 대한 신뢰지수가 좀 더 엄격함을 보였다.

- (3) 본 연구 대상물인 테이프 피더용 내장 공압 액추에이터는 엄격한 고장기준 하에서 90%의 신뢰구간에 대한 평균고장수명이 1000만회 이상, B_{10} 수명이 약 950만회 정도임을 감안하면 반도체 장비의 요소부품으로 충분히 신뢰할 수 있는 우수한 성능을 갖추었다고 평가할 수 있다.

참고 문헌

- (1) Cho, T. H. and Lee, S. J., 2002, "An Inspection System for Measuring Feeding Accuracy of Tape Feeders," *Journal of Control, Automation and Systems Engineering*, Vol. 8, No. 7, pp. 573~577.
- (2) Lee, S. H., Kim, J. S., Song, J. Y., Lee, S. W. and Park, H. Y., 2001, "A study on Reliability Data Analysis for Components of Machining Center," *KSPE Conference*, Vol. 1, No. 1, pp. 88~91.
- (3) Lee, S. W., Song, J. Y., Hwang, J. H., Lee, H. Y. and Park, H. Y., 2001, "Method and Application of Reliability Evaluation for Core Unites of Machine Tools," *KSPE Conference*, Vol. 1, No. 1, pp. 43~46.
- (4) Lee, H. Y., Park, J. K. and Song, J. Y., 2001, "A Case Study on Reliability Analysis of Machining Center," *KSMTE Conference*, Vol. 1, No. 1, pp. 418~421.
- (5) Kim, B. S., Kim, J. S., Lee, S. H., Song, J. Y. and Park, H. Y., 2001, "A Study on Failure Mode Analysis of Machining Center," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 74~79.
- (6) Moon, J. S., Kim, J. W., Shin, J. C. and Kim, M. S., 2005, "Reliability Estimation of Door Hinge for Home Appliances," *Journal of the Korean Society of Mechanical Engineers*, Vol. 29, No. 5, pp. 689~697.
- (7) Kim, B. S., Lee, S. H., Song, J. Y. and Lee, S. W., 2005, "Reliability Assessment of Machine Tools Using Failure Mode Analysis Programs," *Journal of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 14, No. 1, pp. 15~23.
- (8) Nelson, W., 1985, "Weibull Analysis of Reliability Data with few or no failure," *Journal of Quality Technology*, Vol. 17, No. 3, pp. 140~160.