

공작기계 부품의 신뢰성 데이터 해석에 관한 연구

이수훈*(아주대 기계 및 산업공학부), 김종수(아주대 대학원 기계공학과)
송준엽, 이승우, 박화영(한국기계연구원 자동화연구부)

A Study on Reliability Data Analysis for Components of Machining Center

S. H. Lee(Mech. & Ind. Eng. Dept., Ajou Univ.), J. S. Kim(Mechanical Eng., Ajou Univ.)
J. Y. Song, S. W. Lee, H. Y. Park(Automation Engineering, KIMM)

ABSTRACT

The reliability data analysis for components of CNC machining center is studied in this paper. The failure data of mechanical part is analyzed by Exponential, Weibull, and Log-normal distributions. And then, the optimum failure distribution model is selected by goodness of fit test. The reliability data analysis program is developed using ASP language. The failure rate, MTBF, life, and failure mode of mechanical parts are estimated and searched by this program. The failure data and analysis results are stored in the database.

Key Words · Reliability (신뢰성), Failure rate (고장율), Failure mode (고장모드), Weibull distribution (와이블분포), Exponential distribution (지수분포), Log-normal distribution (대수정규분포)

1. 서론

최근 모든 산업 분야에서 소비자의 요구와 권리가 커지고 제품의 내구성이 강조됨에 따라 신뢰성 개념을 도입한 제품의 설계와 평가의 중요성이 날로 증대되고 있다. 신뢰성이란 제품을 구성하는 재료, 부품, 제품 또는 소프트웨어가 고장 혹은 오류 없이 운용될 가능성의 정도를 나타내는 정성적 기준을 나타내며, 이러한 신뢰성 평가를 통해 미래의 품질이나 고장을 예측하고, 보증할 수 있다. 따라서 개발이 완료된 제품을 대상으로, 규격에 기준한 품질, 성능에 대한 불량율을 검사하는 기존의 성능평가와는 구분된다.

공작기계 시스템은 수많은 기계와 전자 부품으로 이루어져 있고 개개의 구성부품들이 서로 연관되어 전체 시스템의 성능을 발휘하므로 공작기계 시스템의 성능을 향상시키기 위해서는 설계 시 신뢰성 높은 부품의 선정이 필요하다. 이를 위해서는 각 부품에 대한 고장율과 같은 신뢰성 지표를 알아야 하며 이러한 부품별 신뢰성 데이터를 이용해 설계된 전체 시스템의 고장율을 예측할 수 있고 설계 목표를 충족하는가를 확인할 수 있다. 전자 부품에

대한 신뢰성 데이터들은 많이 축적되어 있으나 기계 부품에 대한 신뢰성 연구는 미진하여 확보된 데이터가 많지 않다. 기계류에 대한 기존의 신뢰성 데이터베이스로는 NPRD-95, NSWC, Bellcore 등이 있다. 1 차적으로는 기존의 신뢰성 데이터베이스를 활용하지만 자료가 없는 부품들은 신뢰성 시험이나 현장으로부터 구한 고장이력 데이터들을 이용하여 고장율을 예측하여야 한다.

Wang 등은 2년간 80여대의 CNC 선반으로부터의 고장데이터를 수집하여 고장율과 고장모드해석을 수행한 바 있으며⁽¹⁾ 김봉석 등은 국내의 CNC 머시닝센터를 부품별로 분류하고 기존의 데이터베이스를 활용하여 부품별 고장율과 고장모드 분석을 수행하여 고장율이 높은 부품들을 순위화하였다.⁽²⁾

본 연구에서는 공작기계의 부품이나 제품의 고장이력 데이터 또는 신뢰성시험 데이터를 이용한 신뢰성 데이터 해석과 데이터베이스 구축에 대한 연구를 수행하였다. 웹(web)상에서 누구나 쉽게 데이터를 입력하여 결과를 알 수 있도록 하였으며 이러한 데이터들은 모두 데이터베이스에 축적되어 공작기계 뿐만 아니라 일반 기계류의 신뢰성 설계의 평가시에 유익하게 쓰일 수 있도록 하였다.

2. 신뢰성 데이터 분석

2.1 신뢰성 데이터 분석 과정

신뢰성 분석을 위해 수집해야 할 신뢰성 데이터로는 고장부품, 고장시간, 고장메커니즘/고장모드, 고장원인, 사용조건, 고장조치내역 등이 있다.

고장시간과 사용조건, 고장 개수는 고장을 예측에 사용되어지며, 고장메커니즘/고장모드, 고장원인 등은 고장모드해석(FMEA)에 이용된다. 고장모드란 부식, 파괴, 마모 등 고장이 일어나는 물리적 형태를 의미하며, 고장모드해석이란 시스템에서 발생할 수 있는 모든 부품의 고장모드에서 시스템이 잠재적으로 경험할 수 있었던 고장의 모든 결과를 추적해 나가는 상향식 방법으로, 구성 부품의 고장모드가 시스템에 어떠한 영향을 미치는가를 평가할 수 있다.

본 연구에서는 위에 열거한 신뢰성 데이터 중 고장 부품 고장이력 데이터와 해당 고장에 대한 고장모드를 수집하여 부품의 고장율과 평균고장시간을 예측하고 고장모드의 빈도분석을 한 후 그 결과들을 데이터베이스화 하는 신뢰성 데이터 분석법에 대해 다루었다.

신뢰성 데이터 분석 과정을 도표로 나타내면 Fig 1 과 같다

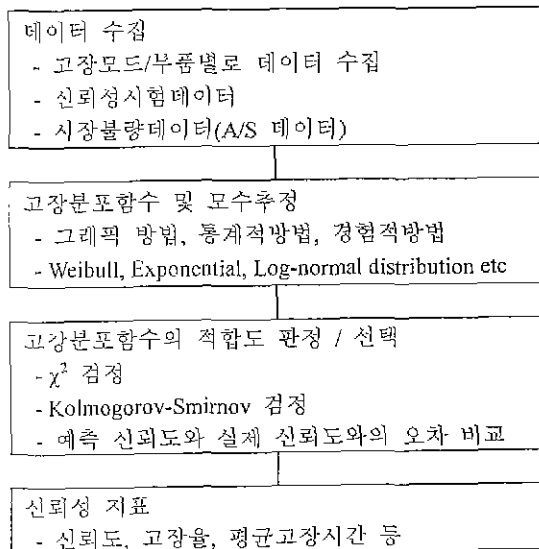


Fig. 1 Reliability data analysis procedure

2.2 고장 확률 분포 함수

Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 고장 데이터를 이용해 부품이나 제품의 고장율을 알기 위해서는 여러 가지 고장분포함수를 사용하여 고장을 함수를 추정하여야 한다. 각 확률분포 함수들의 모수 추정 방법

에는 최대우도추정법(maximum likelihood method) 또는 최소제곱추정법(least squared method) 등이 쓰인다. 신뢰성 분석에 주로 쓰이는 고장분포함수로는 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포 등이 있다. 각 분포 함수들의 신뢰도 함수와 고장을 함수를 Table 1 에 나타냈다⁽³⁾

Table 1 Reliability and failure rate functions

	Reliability, $R(t)$	Failure rate, $\lambda(t)$
Exponential	$e^{-\lambda t}$	λ
Weibull	$e^{-\left(\frac{t}{\eta}\right)^m}$	$\frac{m}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{m-1}$
Log-normal	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}$ $\int_0^t \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$

지수분포함수는 수학적 유도가 용이하며 전자제품 등 많은 제품들의 수명이 지수분포를 따르므로 고장분포함수로 많이 쓰인다. 와이블분포는 모수의 값에 따라 지수분포를 포함한 대부분의 고장분포함수를 묘사할 수 있고 형상모수 m 에 따라 초기고장, 우발고장, 마모고장을 판단할 수 있다. 대수정규분포는 금속의 피로, 반도체와 같은 부속의 수명자료 분석에 널리 쓰인다. 기존의 연구 결과에 따르면 기계류의 고장분포는 와이블분포나 대수정규분포가 적합한 것으로 알려져 있다.⁽¹⁾

2.3 고장 확률 분포 함수의 검정

확보된 고장 이력 데이터를 이용해 고장분포함수를 추정된 후, 추정된 분포함수가 실제 데이터의 분포를 잘 표현하고 있는지 확인하는 과정이 필요하다. Fig. 1 에서 보듯이 Kolmogorov-Smirnov 검정이나 χ^2 검정을 이용하여 추정된 고장분포함수의 적합도를 판정한다.

기계부품류의 경우 고장이 일어나기까지의 시간이 길고 현장 데이터의 확보가 어려워 단지 몇 개의 한정된 데이터를 가지고 고장을 함수를 예측하여야 하므로 신뢰도 높은 확률분포함수를 선정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 하나의 고장 데이터 군에 대해 여러 가지 확률분포로 추정된 후 각각에 대한 검정을 수행하여 가장 적합한 확률분포를 선택하는 방법을 택하였다. 가장 적합한 고장확률분포의 선택 기준을 다음과 같이 결정하였다.

- 1) Kolmogorov-Smirnov 테스트 결과 D_{max} 가 최소인 확률분포
- 2) 신뢰도함수 $R(t)$ 의 오차가 최소인 확률분포

3) 확률밀도함수 $f(t)$ 의 오차가 최소인 확률분포

Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정은 예측된 신뢰도 함수가 주어진 데이터의 신뢰도 특성을 충분히 나타내고 있는가를 알아보기 위해, 예측된 불신뢰도 함수(누적밀도함수) $F_E(t)$ 와 실제 관측된 불신뢰도 함수 $F_O(t)$ 를 비교하는 것이다. 즉, $D = |F_E(t) - F_O(t)|$ 의 최대값을 D 의 허용치 D_c 와 비교하여 주어진 유의수준에서 $D_{max} < D_c$ 라면 검정결과에 대해 만족하게 되는 것이다. D_c 값은 표본수와 유의수준에 따라 결정된다. 이를 식으로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$D_{max} = \max_{1 \leq i \leq n} \{ |F_E(x_i) - F_O(x_i)| \} \quad (1)$$

여기에서, n 은 데이터의 수이다.

신뢰도함수의 오차와 확률밀도함수의 오차는 식 (2), (3)을 통해 구한다.

$$\epsilon_R = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \{ R_E(x_i) - R_O(x_i) \}^2} \quad (2)$$

$$\epsilon_f = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n \{ f_E(x_i) - f_O(x_i) \}^2} \quad (3)$$

여기에서, R_E 와 f_E 는 예측된 신뢰도함수와 확률밀도함수이고, R_O 와 f_O 는 관측된 신뢰도함수와 확률밀도함수이다.

2.4 고장 이력 데이터 분석의 예

지금까지 설명한 신뢰성 데이터 분석법을 이용하여 고장 이력 데이터 분석을 하였다. 해석에 사용된 임의의 고장 데이터는 Table 2와 같다. Table 2에서 Censored data는 관측중단데이터로서 해당 시간까지 관측한 결과 고장이 나지 않은 데이터이다.

Table 2 Rivet failure data [hours]

Failure No	Failure data	Censored data
1	50	170
2	67	170
3	80	170
4	92	
5	103	
6	114	
7	125	
8	135	
9	146	
10	156	

각 확률분포의 모수 추정값은 Table 3 과 같고

적합도 검정 결과를 Table 4 에 나타내었다.

Table 3 Estimated parameters of each distribution

Distributions	Parameters
Exponential	$\lambda = 0.00634$
Weibull	$m = 2.751$ $\eta = 144.66$
Log-normal	$\mu = 4.616$ $\sigma = 0.346$

Table 4 Result of goodness of fit test

	Exponential	Weibull	Log-normal
K-S test, D_{max}	0.269	0.094	0.095
Error of $R(t)$	0.048	0.013	0.017
Error of $f(t)$	0.040	0.020	0.026

고장데이터수가 10 개일 때 95% 유의수준에서 D_c 값은 0.322 로 세 분포함수는 모두 Kolmogorov-Smirnov 테스트는 만족하나 Table 4 의 결과에서 알 수 있듯이 Table 2 에 나타난 고장 데이터의 패턴을 가장 잘 묘사하는 분포함수로 와이블분포를 선택할 수 있다. 형상모수 m 이 1 보다 크므로 마모고장의 특성을 지님을 알 수 있으며 계산결과 평균고장시간(MTBF)은 128.7 시간이다

3. 공작기계 부품의 신뢰성데이터 분석 및 데이터베이스 프로그램 개발

3.1 프로그램 구성

공작기계 부품의 고장 이력 데이터 또는 신뢰성 시험 결과를 이용한 신뢰성 데이터 분석을 누구나 쉽게 할 수 있게 하고 이 결과들을 데이터베이스화 하는 프로그램을 개발하였다. 신뢰성 데이터 분석을 위한 상용 프로그램이 다수 개발되어 사용되어지고 있으나 이들은 모두 입력된 데이터에 대한 각각의 확률분포 해석 결과와 신뢰성 지표들을 보여 주는데 그치고 있다. 본 연구에서 개발된 신뢰성 데이터 해석 프로그램은 공작기계부품을 선택한 후 그 부품에 대한 고장데이터와 고장모드를 입력하면 여러 확률분포에 대한 해석을 수행하고 그 결과들을 보여준 후 가장 최적의 고장분포함수를 선택한다. 입력된 고장데이터와 고장모드들은 모두 데이터베이스에 축적되어 추후 해당 부품에 대한 신뢰성 지표(고장율, MTBF 등)를 검색할 수 있게 하였다. 또한 부품의 고장모드를 검색하면 저장된 데이

터베이스로부터 해당 부품의 고장모드를 백분율로 순위화하여 고장모드별 히스토그램을 도시하도록 하였다. 인터넷으로 접속하여 웹상에서 데이터를 입력하고 결과를 볼 수 있도록 ASP(Active Server Pages)를 사용하여 프로그래밍하였다. 입력 형태의 표준화를 위하여, 머시닝센터의 설계도와 파트리스트를 기본으로 구성된 공작기계의 분류도로부터 부품명들을 추출하였으며, 고장모드는 FMD-97 자료를 바탕으로 추출한 후 이를 DB 화하여 부품명과 고장모드를 선택할 수 있도록 하였다.⁽²⁾

신뢰성 데이터 해석 프로그램의 흐름도는 Fig. 1 과 같다.

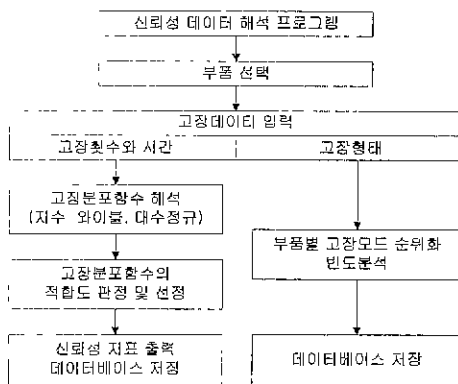


Fig. 1 Flow chart for reliability data analysis program

3.2 신뢰성 데이터 해석 프로그램 실행 예

Table 2 에 나타난 고장데이터를 신뢰성 데이터 해석 프로그램을 이용하여 분석하였다. 고장데이터 입력과정은 Fig. 2, 분석결과는 Fig. 3 과 같다.

4. 결론

공작기계 부품의 고장이력 데이터 또는 신뢰성 시험 데이터를 이용하여 고장율, 평균고장시간 등의 신뢰성 지표들을 예측하고 이를 데이터베이스화 하는 연구와 프로그램 개발을 수행하였다. 기계류의 고장데이터는 많지 않기 때문에 보다 정확한 고장분포함수 예측을 위해 하나의 데이터군을 여러 가지의 확률분포함수로 추정한 후 가장 오차가 작은 함수를 최적고장분포함수로 선정하도록 하였다.

신뢰성 데이터 해석 프로그램은 웹상에서 누구나 쉽게 데이터를 입력하여 신뢰성 예측 결과를 얻을 수 있도록 하였으며 각 부품에 대한 신뢰성 결과와 고장모드나 빈도분석 결과도 검색할 수 있도록 하였다. 향후 데이터가 많이 축적되게 되면 NPRD-95(Nonelectronic Parts Reliability Data)와 FMD-97(Failure Mode Mechanism/Distributions)과 같은 외국

의 상용데이터베이스와 유사한 우리나라 공작기계 에 대한 신뢰성 데이터베이스가 도출될 것으로 예상된다.

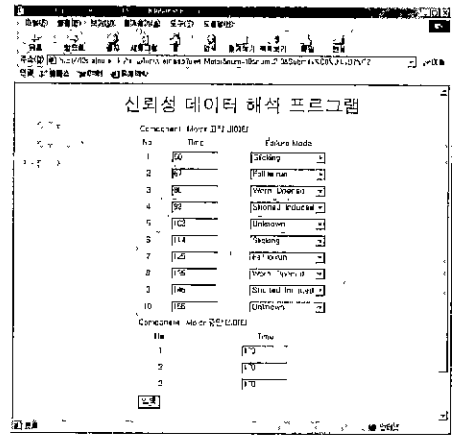


Fig. 2 Failure data input

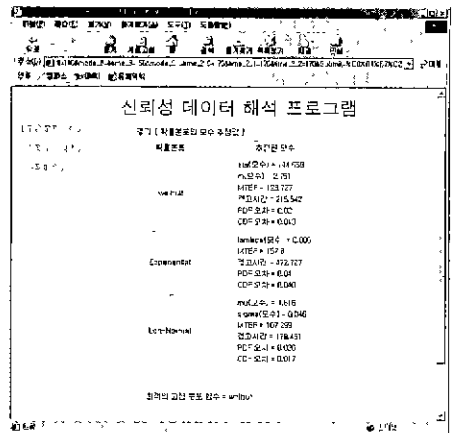


Fig. 3 Reliability analysis result

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음

참고문헌

1. Yiqiang Wang, Yazhou Jia, "Failure Probabilistic Model of CNC Lathes," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 65, 1999
2. 김봉석, 김중수, 이수훈, 송준엽, 박화영, "머시닝센터의 고장모드 해석에 관한 연구," 한국정밀공학회지, 제 18 권, 제 6 호, 2001
3. 한국공업표준협회, "신뢰성의 분포와 통계," 1992.