

공작기계의 신뢰성 평가를 위한 고장 모드 해석에 관한 연구

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

A Study on Failure Mode Analysis for Reliability Assesment of Machining Center

S. H. Lee(Mech. & Industrial Eng. Dept., Ajou Univ.) J. S. Kim, B. S. Kim(Mech. Eng. Dept., Ajou Univ.), J. Y. Song, S. W. Lee, H. Y. Park, J. K. Park(KIMM)

ABSTRACT

In this study, a failure mode analysis of CNC machining center is described. At first, the system is classified through subsystems into components using part lists and drawings. The components failure rate and failure mode analysis are performed to identify the weak components of a machining center with reliability database. The failure probabilistic function of mechanical part is analyzed by Weibull distribution. The Kolmogorov-Smirnov test is also used to verify the goodness of fit.

Key Words : Reliability (신뢰성), Machining center (머시닝센터), Failure mode (고장모드), Failure rate (고장률), Weibull distribution (와이블분포)

1. 서론

최근 모든 산업분야에서 최첨단 기술의 사용이 증가함에 따라 기존의 단순한 안전계수를 바탕으로 한 제품의 설계·생산보다는 신뢰성(Reliability) 개념을 도입한 생산 기법이 사용되고 있다. 신제품이나 첨단제품을 개발할 경우 시스템(System) 및 구성부품(Component)들의 신뢰성 부여 문제는 해당 기술분야의 선도적 역할과 제품 사용의 안전성 측면에서도 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다.

공작기계 시스템은 수많은 구성부품으로 이루어져 있고 개개의 구성부품들이 서로 연관되어 전체 시스템의 성능을 발휘하므로 신뢰성을 향상시키기 위해서는 높은 신뢰성이 요구되는 기계부품의 설계가 필요하다. 이를 위해서 설계단계에서 신뢰성을 예측하여 목표를 충족하는가를 확인하고 충족하는 방식을 선택하여 신뢰성목표에 도달할 수 있도록 하여야한다. 시스템이 대용량화·다기능화 되어 신뢰성이 중요한 문제로 제기되면서 시스템을 구성하는 기본 단위인 구성부품의 고장률이 중요하게 되었고, 구성부품의 정확한 고장률 예측이 시스템 수준의 신뢰도 예측의 정확성에 큰 영향을 미치게 되었다.

공작기계 시스템 및 구성부품에 대한 신뢰성 예측기법으로는 부품 고장데이터 분석법이, 고장모드 평가·분석방법으로는 고장모드 및 영향분석법(FMEA: Failure Mode and Effect Analysis)이 유용한 방법으로 알려져 있다.

본 연구에서는 공작기계시스템 중 현재 운용되고 있는 CNC 머시닝센터에 대한 시스템 분류도를 작성하고, 최하위 단계인 부품의 고장률과 고장모드를 해석하는 기법을 제시하였다. 또한 신뢰성 데이터가 없을 때 고장이력 데이터를 이용하여 고장률을 예측하는 방법을 예를 들어 제시하였다.

2. 머시닝센터 분류도

2.1 서브시스템의 분류

머시닝센터는 복잡한 형상의 제품을 높은 정밀도로 가공하며, 여러 종류의 공구를 자동으로 교환해가면서 순차적으로 정면 및 홈 가공, 구멍 뚫기, 보링 가공, 나사 절삭 등을 효율적으로 하는 복합 공작기계이다. 머시닝센터의 신뢰성을 예측하기 위해서 먼저 선행되어야 할 것이 전체시스템을 단계별 서브시스템과 최하위 단계인 구성부품까지 분류하는 것

이다. 일반적으로 서브시스템을 분류하는 방법으로는 구성부품 관점의 분류방법과 기능적 관점의 분류방법이 적용되는데, 본 연구에서는 시장에서 판매되고 있는 머시닝센터의 파트리스트(Part list)와 설계도를 기본으로 하여 구성부품 관점에서 분류하였다. 구성부품의 관점은 할당된 기능에 따라 2~3개의 서브시스템이 중복되어 분류되는 불합리한 점도 있으나 외형상 구분이 용이하여 쉽게 분류할 수 있는 장점이 있다.

머시닝센터 전체 시스템은 ATC(Auto Tool Changer) & Magazine, APC(Auto Pallet Changer), HEAD, 구동부, Table, 유압장치, 냉각장치, 컬럼 및 베드 그리고 제어장치의 모두 9개의 1차 서브시스템으로 분류할 수 있다.

2.2 시스템 분류도

전체시스템에서 분류된 9개의 1차 서브시스템 중 컬럼 및 베드와 제어장치를 제외한 7개의 서브시스템으로부터 최종 하위레벨인 구성부품까지의 분류도를 Fig. 1에 도시하였다. 컬럼 및 베드는 고강성을 유지하므로 고장이 거의 없고, 제어장치는 동작기계의 서브시스템이라기보다는 제어장치만을 전체시스템으로 본 전자장비로 간주하여 전자부품의 고장데이터를 이용하여 신뢰성을 예측할 수 있을 것이라 판단되었기 때문에 제외시켰다. 본 머시닝센터는 650여개 이상의 구성부품으로 되어 있으나 주요부품을 중심으로, 파트리스트를 기본으로 하여 5단계 레벨의 49개 구성부품으로 간소화 시켰다.

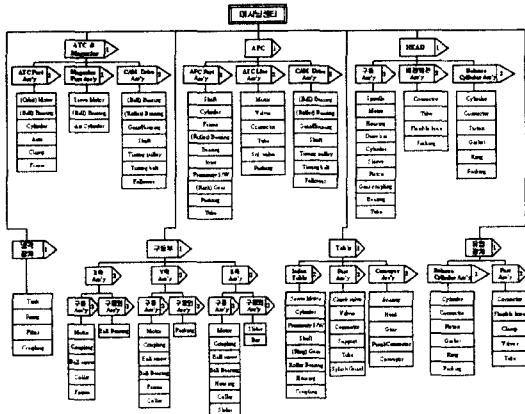


Fig. 1 System block diagram of machining center

3. 고장 모드 해석

Fig. 1에서 분류된 49개의 구성부품에서 각각의 고장모드를 분류하여 구성부품과 고장모드의 고장률을 산출해야 전체 시스템의 신뢰성예측에 적용할 수

있다. 동작기계에 바람직한 고장모드평가방법으로 알려진 FMEA는 시스템에서 발생할 수 있는 모든 부품의 고장모드에서 시스템이 잠재적으로 경험할 수 있었던 고장의 모든 결과를 추적해 나가는 상향식(Bottom-up) 방법으로 구성부품의 고장모드가 시스템에 어떠한 영향을 미치는가를 평가할 수 있다.

3.1 구성 부품별 고장률

기계시스템의 구성 부품에 대한 고장률 데이터, 즉 시험 및 평가에 의한 시험데이터와 고장 및 수리·교체이력의 현장데이터가 국내에는 전무한 실정이기 때문에 외국에서 발표된 신뢰성 데이터베이스인 NPRD 95(Non-electronic Parts Reliability Data)와 FMD 97(Failure Mode Distributions)의 고장률과 고장모드 등을 이용하였다. 그러나 49개의 모든 구성부품 고장률과 고장모드를 얻을 수 없었고, 이 중 머시닝센터와 사용환경이 유사한 고장률 데이터를 중심으로 20개의 데이터를 확보할 수 있었다. Fig. 2는 20개의 구성부품 고장률을 순위화하여 히스토그램으로 도식화 한 것이다. 구성 부품 중 커넥터, 모터, 펌프, 타이밍벨트, 체크밸브, 클램프, 스펀들 등이 고장이 일어날 확률이 높은 것으로 나타났다.

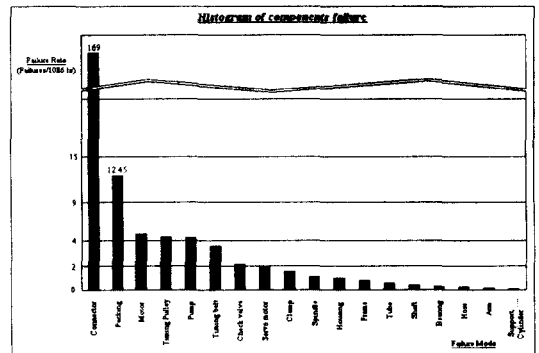


Fig. 2 Histogram of components failure

3.2 구성 부품의 고장 모드 분석

한 부품에서의 고장은 여러 가지 형태로 발생한다. 부품에서 일어날 수 있는 고장의 형태와 그 빈도를 분석하는 것이 고장모드 분석이다. 구성 부품별 고장모드는 머시닝센터 매뉴얼(Manual)과 NPRD 95와 FMD 97의 데이터를 참조하여 분석하였다. Table 1은 구성 부품 중 베어링의 고장모드를 나타낸 것이다.

모달 고장모드 확률은 부품의 고장률과 고장모드 확률의 곱으로 나타내며, 빈도수와 고장등급을 가중치로 부여하면 FMECA(Failure Mode and Effect Criticality Analysis) 방법으로 확대할 수가 있다. Fig. 3은 데이터가 확보된 20개의 구성부품의 고장률과

각 고장모드의 곱을 순위화하여 히스토그램으로 도식화 한 것이다.

Table 1 Components failure rate and failure mode

Components	Failure Rate	Failure Mode	Failure Mode Probability	Modal Failure Rate
Bearing	.266	Worn	.30	.080
		Sticking	.10	.027
		Loss of lubrication	.06	.016
		Contaminated	.03	.008
		Scored	.02	.005
		Others	.16	.043
		Unknown	.33	.088

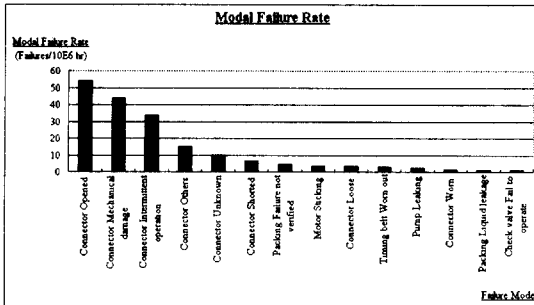


Fig. 3 Histogram of modal failure rate

3.3 현장데이터와의 연계

고장모드 해석 결과의 타당성 검토를 위해서는 현장데이터와의 연계를 통한 확인이 필요하다. Table 2는 공작기계협회에서 수집된 수직형 머시닝센터의 클레임 현상 데이터 중 일부를 발췌한 자료이다.

Table 2 Claim data of vertical machining center

서비스시스템	Claim 현상
구동축	각축 베어링 파손으로 인한 소음발생
	각축 벨트 마모 및 파손
HEAD	베어링 소손으로 인한 소음발생
	스핀들 작동불가
ATC	ATC Arm 변형발생
유압장치	각 부 벨브 및 솔레노이드 벨브 소손
	냉각펌프 모터 작동불가
	윤활펌프 작동불가

앞에서 수행한 고장모드해석의 결과 중 순위가 높은 고장 부품들이 실제 현장에서의 클레임 현상들에서 자주 나타나고 있는 것을 확인할 수 있었으며 확보된 클레임 데이터에 빈도수나 고장시간에 대한 데이터가 있다면 더 정확한 고장모드해석을 수행할 수 있을 것이다.

4. 고장률 함수 예측

4.1 신뢰성 데이터 관리

지금까지 공작기계를 부품별로 분류하고 기존의 신뢰성 데이터베이스(NPRD 95, FMD 97)들을 바탕으로 공작기계의 고장모드 해석을 수행하였다. 기계 부품별 고장률에 대한 정보는 국내에서 확보된 것이 거의 없으므로 일차적으로는 기존의 데이터베이스 자료를 활용하지만 자료가 없는 부품에 대해서는 신뢰성 시험이나 A/S 데이터와 같은 현장데이터를 이용하여 고장률 함수를 예측하여 이를 데이터베이스화하여야 한다.

고장률 함수는 장비의 수명과, 그 당시의 단위시간당 고장 발생회수인 고장빈도와와의 관계를 나타내며 신뢰성공학에서 가장 중요한 개념이다. 고장률 함수는 고장시간의 분포형태에 따라 지수(Exponential)분포, 와이불(Weibull)분포, 대수정규(Log-normal)분포, 감마(Gamma)분포 등으로 표현할 수 있다. 전자 부품의 경우 지수분포를 가장 잘 따르는 것으로 알려져 있으나, 기존의 연구결과 기계 부품의 고장률 함수는 와이불분포나 대수정규분포가 고장 패턴을 가장 잘 묘사하는 것으로 나타났다.

각 확률분포들의 모수들은 최대우도법(Maximum likelihood method)이나 최소자승법(Least square method)을 이용해서 추정하며, 해당 분포의 적합도를 판정하기 위하여 Kolmogorov-Smirnov 검정이나 χ^2 검정을 이용하여 해당 분포의 적합도를 판정한다.

기계부품류의 경우 고장이 일어나기까지의 시간이 길고 현장 데이터의 확보가 어려워 단지 몇 개의 한정된 데이터를 가지고 고장률 함수를 예측하여야 하므로 신뢰도 높은 확률분포함수를 선정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 신뢰성 시험의 결과 또는 과거의 고장이력 데이터를 이용하여 보다 정확한 고장률 함수를 예측하는 프로그램을 향후 개발할 예정이며, 먼저 이를 위한 방법과 적용 사례를 설명하기로 한다.

4.2 와이불 분포 함수 해석

여러 확률분포함수 중 Weibull 함수는 대부분의 고장분포함수를 묘사할 수 있으며 형상모수에 따라 초기고장, 우발고장, 마모고장기간을 판단할 수 있으므로 신뢰성 모델로서 가장 자주 사용된다. 와이불 분포에 관계된 함수들은 식 (1)~(3)과 같다.

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

$$\text{신뢰도함수: } R(t) = \exp\left[-\left(\frac{t}{\eta}\right)^\beta\right] \quad (2)$$

$$\text{고장률함수: } \lambda(t) = \frac{\beta}{\eta} \left(\frac{t}{\eta}\right)^{\beta-1} \quad (3)$$

Table 3에 베어링 수명에 대한 데이터를 나타냈

고 이 고장 이력 데이터를 가지고 와이블 분포 함수를 예측하였다. 모수 추정결과는 Table 4와 같다.

Table3 Bearing life data (hours)

Failure No.	Failure time
1	16,000
2	34,000
3	53,000
4	75,000
5	93,000

Table 4 Estimated parameters of Weibull distributions

Parameters	Values
Scale (η)	63642.4
Shape (β)	1.490

계산된 와이블 확률 분포의 형태를 Fig. 4에 도시하였다.

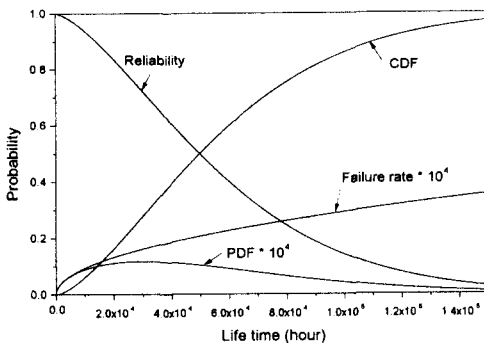


Fig. 4 Weibull probability plot

앞에서 구한 고장 분포 함수의 적합도를 판정하기 위하여 본 연구에서는 Kolmogorov-Smirnov 검정을 사용하였다. Kolmogorov-Smirnov 적합도 검정은 예측된 신뢰도 함수가 주어진 데이터의 신뢰도 특성을 충분히 나타내고 있는가를 알아보기 위해, 예측된 불신뢰도함수 $F_E(t)$ 와 실제 관측된 불신뢰도함수 $F_O(t)$ 를 비교하는 것이다. 즉, $D = |F_E(t) - F_O(t)|$. D 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. 검정 결과 5% 유의수준에서 $D_{max} = 0.1721 < D_c = 0.565$ 이므로 4.2절에서 예측된 와이블 함수는 신뢰도를 예측함에 있어 만족할 만한 결과를 제시하고 있다고 판단된다. Table 3에 나타난 베어링의 수명 분포는 형상모수(β)가 1보다 크므로 마모고장을

나타내고 있으며, 베어링의 MTBF는 식 (4)와 같다.

$$MTBF = \eta \times \Gamma\left(\frac{1}{\beta} + 1\right) = 57,500 \text{ hours/failure} \quad (4)$$

향후 하나의 데이터 군을 가지고 여러 가지 분포 함수에 대해 예측하고 각각의 검정을 통해 가장 적합한 고장함수를 선정하도록 해야 할 것이며 이렇게 예측된 데이터는 모두 신뢰성 데이터베이스로 축적 되도록 할 것이다.

5. 결론

지금까지 현재 운용되고 있는 CNC 머시닝센터를 설계도와 부품리스트를 중심으로 상위레벨에서 부품레벨까지 분류하였으며 기존의 신뢰성 데이터베이스를 이용하여 각 부품의 고장률과 고장모드들을 조사하였다. 고장률과 고장모드해석 결과 머시닝센터에서는 커넥터, 모터, 펌프, 타이밍벨트, 체크밸브, 클램프, 스펀들 등이 고장확률이 높은 것으로 나타났으며 전체 시스템의 신뢰도를 향상시키기 위해서는 이러한 부품들의 신뢰도를 높이는 것이 보다 효율적임을 알 수 있다. 현장에서의 클레임 현상 자료와 비교했을 때 상기 부품들의 고장현상이 실제 높게 나타남을 알 수 있었다.

기계 부품류에 대한 고장률 데이터는 미비하고 새로운 제품에 대한 신뢰성 데이터는 없으므로 신뢰성 시험이나 현장에서의 고장이력데이터를 이용해 고장률을 예측하여야 한다. 여러 고장분포함수 중 가장 많이 쓰이는 와이블분포를 이용하여 베어링 수명데이터를 해석하였고 적합도 검정을 통해 추정된 고장분포함수가 적합함을 확인할 수 있었다. 향후, 보다 정확한 고장률 함수를 예측하고 이를 데이터베이스화하는 프로그램을 개발할 예정이다.

참고문헌

1. 김원경, "시스템 신뢰성 공학," 교우사, 1999.
2. Yiqiang Wang, Yazhou Jia, "Failure Probabilistic Model of CNC Lathes," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 65, 1999.
3. H. Paul Barringer, David P. Weber, "Where is my data for making reliability improvements?," 4th international conference on process plant reliability, 1995.
4. "Nonelectric Parts Reliability Data", Reliability Analysis Center, 1995.
5. "Failure Mode/Mechanical Distribution," Reliability Analysis Center, 1997.