

## 공작기계 핵심부품의 QFD 기술

송준엽\*, 이승우, 강재훈, 황주호, 이현용, 박화영(한국기계연구원 자동화연구부)

### Quality Function Deployment of Core Unit for Reliability Evaluation of Machine Tools

J. Y. Song, S. W. Lee, J. H. Kang, J. H. Hwang, H. Y. Lee, H. Y. Park(Automation. Eng. Dept., KIMM)

#### ABSTRACT

Reliability engineering is regarded as the major and important roll for all industry. And advanced manufacturing systems with high speed and intelligent have been developing for the betterment of machining ability. In this study, we have systemized evaluation of reliability for machinery system. We proposed the reliability assessment and design review method using analyzing critical units of high speed and intelligent machine system In addition, we have not only designed and developed test bed system for acquiring reliability data, but also apply QFD technique for satisfying quality function which is provided in design phase. From this study, we will expect to guide and introduce the reliability engineering in developing and processing phase of high quality product

**Key Words** · Reliability(신뢰성), Failure mode(고장원인), Failure Rates(고장율), MTBF(Mean Time Between Failure:고장시간간격), QFD(Quality Function Deployment)

#### 1. 서론

최근 신제품 또는 첨단제품을 개발할 경우 시스템 및 구성부품의 신뢰성 부여 문제는 해당 기술 분야의 선도적 역할과 제품 사용의 안전성 측면에서도 대단히 중요한 부분을 차지하고 있다.

국내에서 개발된 국산화 제품이 널리 사용되지 못하는 이유중의 하나는 국산 개발 제품의 신뢰성에 대한 불확실성(Uncertainty) 때문이다. 제품 개발과정은 제품 Spec.을 결정하고, 설계, 제작 및 조립 후에 내구, 환경, 가속 및 성능 등의 각종 시험을 수행하고 이러한 과정 중에서 나오는 각종 기술적인 문제점을 수정 보완하는 피드백 사이클(Feedback Cycle)을 거친 후에야 최적의 설계도면이 그려지고 완성도 면을 기준으로 대량생산에 착수한다

공작기계 제품과 같은 기계시스템 및 구조물은 다수의 요소 부품 등으로 구성되어 있다. 개개 부품의 기능이 서로 관련되어 전체 시스템의 기능을 발휘하게 되며, 각 부품의 신뢰성이 곧 전체 시스템의 신뢰도를 결정하게 된다 높은 신뢰성이 요구되는 기계부품의 설계 시에 사용재료의 강도나 작용하는 하중 등에 존재하는 불확정성을 보다 정량적이고 객관적으로 통계적인 방법을 이용하여 적절히 처리하는 방법이 신뢰성 평가 기술이다

신뢰성 평가를 위해서는 표준화되고 체계적인 시험 데이터의 수집 및 분석, 시험 항목 및 방법, 시험 장비 개발, 계획 및 절차 등이 수립되어야 하며, 신뢰성 평가기술의 개발 및 구축을 위해서는 체계적으로 정리되고 과학적으로 구축된 세계에서 인증 받을 수 있는 신뢰성 평가기술의 확립이 필요하다.

본 논문에서는 이러한 목적 달성을 위하여 공작기계에서 발생하는 고장모드를 분류/분석하고 제품 개발 및 상품화 단계에서 필요한 QFD(Quality Function Deployment; 품질 기능 전개) 기법을 기술을 적용하여 공작기계의 핵심부품인 주축계와 이송계의 신뢰성 평가를 위한 시험기를 제작하였다.

#### 2. 공작기계의 고장 모드 분류 및 분석

##### 2.1 공작기계의 기능분류와 정의

공작기계는 시스템 기능을 수행하기 위하여 다양한 구성부품과 여러 장치로 이루어져 있다. 일반적으로 서브시스템 기능을 분류하는 방법으로는 구성 부품 관점의 분류방법과 기능적 관점의 분류방법이 적용된다.

구성부품의 분류 관점은 할당된 기능에 따라 2~3개의 서브시스템이 중복되어 분류되는 불합리한 점

도 있으나 외형상 구분이 용이하여 쉽게 분류할 수 있는 장점이 있다. 공작기계(머시닝센터의 경우) 전체 시스템을 ATC(Auto Tool Changer) & Magazine, APC(Auto Pallet Changer), HEAD, 구동부, Table, 유압장치, 냉각장치, 절럼 및 베드 그리고 제어장치의 모두 9개의 1차 서브시스템으로 분류하였다.

분류된 9개의 1차 서브시스템 중 절럼 및 베드와 제어장치를 제외한 서브시스템으로부터 최종 하위 레벨인 구성부품까지의 분류도를 Fig. 1에 도시하였다. 절럼 및 베드는 고장성을 유지하므로 고장이 거의 없고, 제어장치는 공작기계의 서브시스템이라기보다는 제어장치만을 전체시스템으로 본 전자장비로 간주하여 전자부품의 고장데이터를 이용하여 신뢰성을 예측할 수 있을 것이라 판단되었기 때문에 제외시킬 수 있었다.

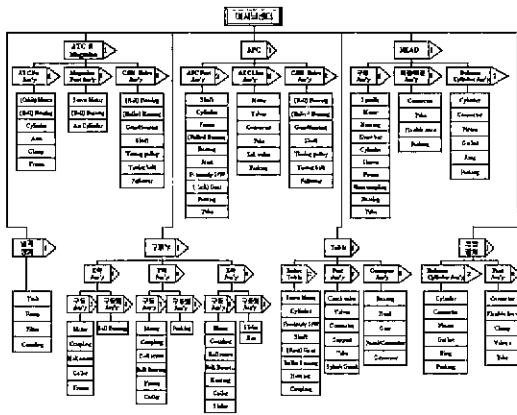


Fig. 1 System Block Diagram of Machine Tools

## 2.2 공작기계 구성부품의 평가 항목

분류된 구성부품에서 각각의 고장모드를 분류하여 구성부품과 고장모드의 고장률을 산출해야 전체 시스템의 신뢰성예측에 적용할 수 있다. 공작기계의 고장모드에 진단에 적합한 평가방법으로 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.

고장모드 분석을 위하여 공작기계가 고속화가 될 경우 발생할 수 있는 고장을 공작기계의 이전 고장 데이터와 고장 항목 등을 예상하여 Table 1.과 같은 평가 항목을 고려하였다.

주요 평가항목으로 시스템 전체측면에서의 기능, 성능시험 등을 평가 구성부품측면에서 고속화에 영향을 미치는 ATC(Automatic Tool Changer) Unit, 구동계, 주축계 등의 속도, 내구성, 정확성, 정/동강성, 소음 등이 있으며 특히 예상되는 공작기계의 주요 고

장은 구동계의 고속운동시 발생될 수 있는 소음의 원인과 새로운 개념의 주축 내구성 등이 주요 신뢰성 평가 항목으로 조사되었다.

Table 1. Reliability Evaluation of Machine Tools

	평가대상	평가항목	평가내용	
고속 지능형 공작 기계	시스템	기능	조작성, 접근성	
		성능	정특성, 동특성 가공성능	
		통합성	시스템 운전	
	ATC Unit	교환시간	Tool to Tool	
		교환정밀도	반복교환시 공구위치 정밀도	
		변형	ATC ARM 변형 유무	
		내구성	내구수명시험, 고장율	
	Tool 인식	내구성, 정확성	센서내구성, 제어시스템 고장율	
	구동계	X, Y, Z 축	속도	속도, 정밀도
			정/동강성	진동모드, 주파수, 파도특성
소음			리니어모터 특성, 슬라이드 커버	
주축계	Spindle (Magnetic 베어링사용)	내구성 소음측정, RPM 특성 측정, 내구성		

## 3. 핵심부품의 QFD 및 시험기 개발

### 3.1 전기장유도부

공작기계의 가공품질에 영향을 미치는 기계적 요소부품은 공구를 회전(머시닝센터의 경우)시키는 주축과 공작물을 이동시키는 이송계이며, 많은 공작기계 사용자들은 유지보수에 있어서 이 두 가지 요소부품을 중요하게 관리한다. 따라서 이 두 가지 요소부품의 신뢰도가 낮아서, 고장 빈도가 높다면 다른 구성부품이 고장났을 때 보다 사용자가 느끼는 신뢰도는 나빠질 것이 분명하다.

또한 공작기계의 고속화/지능화 추세에 따라 주축은 마그네틱 베어링을 이용한 고속주축을 채용하고 이송계는 리니어모터를 사용하는 추세이다. 두 장치는 전기장 유도를 이용하여 구동력을 얻는 것이 특징이다.

Table 2 Failure Mode and Frequency of Spindle System using Magnetic Bearing

분류	요소부품	고장모드	고장빈도
기계부	Spindle	변형, Crack	적음
	Tool Holder	오동작,장성저하	많음
	냉각자켓	냉각능력저하,누유	중간
구동부	구동모터	Short, 단락	적음
	자기베어링	코일 Short, 단락	많음
	변위센서	오동작	중간

두 유닛 중 주로 스틸로 이루어진 기계적 부분은 기존의 것을 많이 사용하고 있어서 예전의 고장율을 그대로 사용할 수 있지만, 새로이 개발되는 마그네틱 베어링과 리니어모터는 기존의 데이터가 전무한 상태이다. Table 2와 3에 마그네틱을 이용한 고속주축시스템과 리니어모터를 이용한 이송시스템의 고장모드 및 빈도를 나타내었다.

Table 3 Failure Mode and Frequency of Feeding System using Linear Motor

분류	요소부품	고장모드	고장빈도
이송 유닛	LM Block	볼베어링마모, 이물질 침투	많음
	Rail	진격도 변형, Scratch	중간
	Table	변형, Crack	적음
전기부	영구자석	자석열의 단락	중간
	Moving Coil	코일 Short, 단락, 볼팅변형	많음
	Hall Sensor	단락	적음

이송시스템의 경우 고정자인 영구자석은 구조가 간단하고 고장이 날 확률이 매우 적으리라 예상되므로 리니어모터 이송계는 이동자에 대하여, 주축 유닛은 마그네틱베어링에 대하여 고장률을 측정하는 것이 필요할 것으로 예상되어 QFD 기법을 이용하여 Table 4와 같이 전기장 유도부에서 발생할 수 있는 고장모드 및 빈도를 분석하였다.

마그네틱베어링은 구조상판에 코일을 적층하고 있는 구조로 리니어모터의 이동자와 매우 유사한 구조를 가지고 있으며 전류의 변화에 의하여 자기장을 형성하여 힘을 발생하는 요소부품이다. 두 요소장치는 전류의 크기에 의하여 발생하는 힘의 크기가 결정되어 지는데 일반적으로, 이론적 계산을 통하여 온도 상승량을 구할 수 있다. 하지만 실제로는 제작시 발생하는 코일간의 유격, 조립부품, 볼팅재료 등에 따라서 연전도율이 크게 바뀌며 이론결과는 어느 정도의 오차를 가지게 된다 따라서 이러한 장치를 통하여 제품이 견딜 수 있는 전류의 크기를 결정하게 된다. 고안된 신뢰성 시험장치는 Fig. 2와 같다.

Table 4. Estimated Reliability Item and Analysis of Failure Mode about Inductive Electric Field

	성능저하	변형	코일 단락	코일 Short	소음
연속전류	☆	☆	○	☆	△
순간최대전류(0.5Sec)	○	○	☆	☆	○
인가전류주파수	○	△	☆	△	☆
인가하중	△	☆	△	△	△

(☆,높음 ○중간 △낮음)

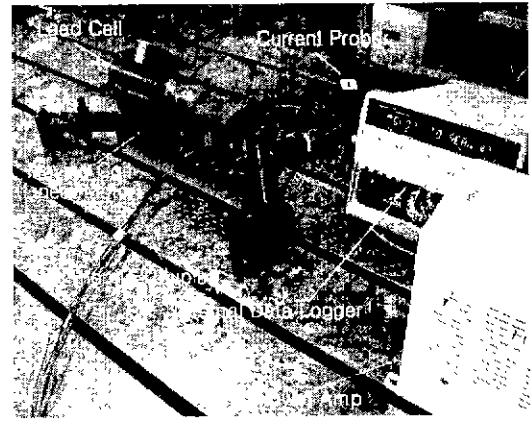


Fig. 2 Reliability Test Bed of Inductive Electric Field

고안된 신뢰성 평가 장치는 Table 4.에서 분석된 QFD 분류 항목에 따라 시스템 전체가 필요 없이 전기장을 유도하는 부위만 따로 분리하여 필요한 센서들을 부착하여 안정적으로 사용할 수 있는 전류의 크기를 구할 수 있다

최대전류는 코일이 단락 되지 않는 순간적인 전류(전류의 공급시간도 일반적으로 1sec 이내에서 결정함)의 크기를 결정하므로 많은 권선이 끊기지 않았는지 여부는 전류공급 전후의 저항의 변화로부터 측정 할 수 있다 연속전류의 선정은 모터 피복이나, 물딩부, 구조물의 변형 등 주로 온도의 상승에 의하여 생기는 연속적인 전류의 크기를 결정하는 것으로, 냉각조건, 대기온도, 외부하중 등의 영향도 크기 받으므로 여러 조건의 실험이 요구된다. 위의 두 가지 전류크기의 결정은 우선 실험조건 변경시 단시간 안에 측정되는 결과로부터 결정하는 값으로 실제로는 이러한 조건하에서도 장시간 운전에 의한 고장에 대한 실험을 이 장치를 활용하여 실험을 통하여 요소부품의 고장율을 구할 수 있다.

### 3.2 슬라이딩커버

일반적으로 공작 기계에서는 칩, 분진, 절삭유 등으로 부터 습동면을 보호하기 위하여 Fig. 3와 같은 대표적인 슬라이딩 커버를 채택하여 사용한다



(a) C-plate (b) Bellows cover (c) Apron cover  
Fig.3 Kinds of Sliding Cover

슬라이딩 커버의 주요 고장 모드는 성능(각동성) 저하 및 소음, 진동이며 이는 반복 운동에 따른 마모의 진전에 의한 것으로 따라서 내구성을 요한다.

기존의 고속 가공 시스템에서 채택하는 약 40~60m/min의 Rapid traverse speed보다 훨씬 가혹한 약 120m/min 정도 운동 분위기 하에서의 슬라이딩 커버에 대한 신뢰성 평가를 위하여 공압 실린더를 채택한 반복 운동형으로 C-plate와 벨로우즈 커버의 2축을 동시에 구현하는 한편, 다양한 커버사양에 대한 유연성을 부여할 수 있는 Fig.4와 같은 시스템을 제작하였다.

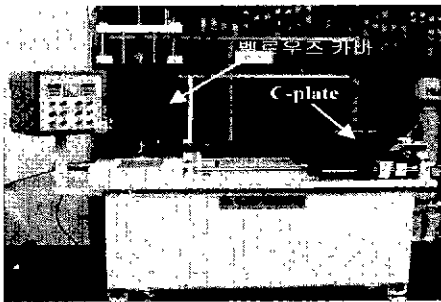


Fig. 4 Reliability Test Bed for Sliding Cover

슬라이딩 커버 끝단에서의 충격 완화를 위한 댐핑 보완과 구조물의 강성 보완을 한 후, AE 센서와 Accelerometer 센서를 사용하여 반복 운동 횟수의 증대에 따른 소음과 진동 측정 실험을 각각 수행할 예정이다

한편, 슬라이딩 커버에 대한 가동 분위기 인자와 고장 모드간의 상호 관계를 정량적으로 유추하기 위하여 QFD 기법을 적용하기 위하여 가중치 스코어를 Table 5.와 같이 설정하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 공작기계의 핵심부품인 주축계와 이송계의 신뢰성 평가를 위해 QFD 기법을 적용하여 공작기계에서 발생하는 고장형태의 분류와 요인을 분석하여 신뢰성 평가항목 및 시험기를 설계/제작하였다

Table 5. Estimated Reliability Item and Analysis of Failure Mode about Sliding Cover

고장모드 가동분위기	성능 저하	소음	진동	마모	파단	부식
반복운동성	☆	○	○	☆	○	-
진동 충격	○	○	☆	△	☆	-
과속	☆	☆	△	△	○	-
파부하	○	△	△	△	☆	-
과열	△	-	-	△	△	○
내환경성	○	△	○	○	△	☆
절삭유 오염	△	-	-	-	-	○

(Unit score: ☆ 9, ○ 3, △ 1)

이는 고속 운동시 발생될 수 있는 문제점 test를 위해 Sliding Cover 시험기와 새로운 개념의 이송 및 주축장치로 사용되는 리니어 모터와 자기 베어링을 이용한 고속 주축의 신뢰성 평가를 위해 전기장유도부 시험기의 제작하여 부족한 기계류 신뢰성 정보의 획득 및 구축을 하기 위해서이다.

추출된 신뢰성 데이터를 이용하여 고장을 분포를 산출하고 이를 바탕으로 개발품목에 대한 신뢰성 평가 및 예측기법을 적용하여 MTBF, FMEA 등과 같은 신뢰성 지표를 구할 수 있다.

#### 후기

이 논문은 중기거점과제인 고속·지능형 시스템의 연구 개발 결과입니다.

#### 참고문헌

1. Yiqiang Wang, Yazhou Jia, "Failure Probabilistic Model of CNC Lathes," Reliability Engineering and System Safety, Vol. 65, 1999.
2. "Nonelectric Parts Reliability Data", Reliability Analysis Center, 1995.
3. "Failure Mode/Mechanical Distribution," Reliability Analysis Center, 1997.
4. "The NEED for Quality Function Development," American Supplier Institute, Inc., 1989.
5. 박화영 외, "고속·지능형 시스템의 신뢰성 평가 기술 개발," 한국기계연구원, 2000.