

## 공작기계의 성능시험을 통한 고장모드해석

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

### The Failure Mode Analysis of Machine Tools using Performance Tests

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

#### ABSTRACT

In view of reliability assessment, the failure mode analysis by performance tests for machine tools is researched in this study. First, the error analysis with circular movement test data is studied. The various errors and their origins are analyzed by error equations and related parts are investigated. Second, This paper deals with analysis of vibration testing for machine tools spindle. The various frequency components are classified by FFT and order analysis. The simple measuring devices and error evaluation programs for tests are also developed.

**Key Words** : Machine tool (공작기계), Performance test (성능시험), Circular movement test (원운동시험), Vibration (진동), Failure mode (고장모드)

#### 1. 서론

최근 모든 산업 분야에서 소비자의 요구와 권리가 커지고 제품의 내구성이 강조됨에 따라 신뢰성 개념을 도입한 제품의 설계와 평가의 중요성이 날로 증대되고 있다. 제품에 대한 신뢰성 평가 기법은 여러 가지가 있는데 시스템 및 구성부품에 대한 신뢰도를 확률분포함수를 이용해 예측하는 고장 데이터분석법과 부품에 발생할 수 있는 고장의 형태와 그 고장으로 인한 시스템의 영향을 분석하는 고장모드영향분석(FMEA: Failure Mode and Effect Analysis) 등이 있다. 고장데이터 분석법은 고장이력 데이터 또는 A/S 데이터를 이용해 각 부품의 고장율을 구하고 이를 이용해 전체 시스템의 신뢰도 또는 평균고장간격시간 등을 예측하는 방법이다. 공작기계 부품의 고장분포해석과 데이터베이스 축적을 위한 프로그램이 개발되어졌고 신뢰성 평가에 사용되고 있다.<sup>(1)</sup> 그러나, 공작기계와 같은 기계류의 경우 고장이 발생하는 횟수가 상대적으로 적고 고장의 구분이 불명확한 경우가 많으므로 고장데이터분석법은 기계류 신뢰성 평가에 있어 많은 한계

가 있다. 따라서 본 연구에서는 공작기계 부품의 고장데이터 해석과 더불어 공작기계의 다양한 성능시험 결과와 공작기계 고장모드와의 상관관계를 연구하여 이를 신뢰성 평가에 활용하고자 하였다. 성능시험을 통하여 얻어진 데이터의 해석으로 고장모드와 관련된 부품을 유출해내고 이를 데이터베이스화하면 공작기계의 신뢰성 평가에 아주 유용한 자료로 활용될 수 있을 것이다.

공작기계의 성능시험 방법은 여러 가지가 있으며 이들은 모두 ISO, JIS, KS 등의 규격에 시험 방법이 규정되어 있다. 이들을 종합해보면 공작기계의 성능시험은 크게 다음과 같은 6가지로 나뉜다.

- ① 기하학적 그리고 운동학적(정밀도) 특성
- ② 열에 의한 영향을 받는 특성
- ③ 정역학적인 특성
- ④ 동역학적인 특성
- ⑤ 소음, 진동
- ⑥ 안전

본 논문에서는 이와 같은 여러 성능 시험 중 다양한 형상오차와 운동오차를 평가할 수 있는 원운동 정밀도 시험과 주축의 진동 측정 시험을 이용한 공

작기계 부품의 고장모드해석에 대해 연구하였다. 각각의 데이터를 분석하여 시험 결과를 출력하고 각각의 고장모드와 관련된 공작기계 부품을 나타내주는 프로그램을 개발하였으며, 다른 측정 장비를 이용해 얻어진 데이터라도 누구나 해석해 볼 수 있도록 웹(web)상에서 구동 되는 프로그램도 개발하여 서비스할 수 있도록 하였다.

## 2. 원운동 정밀도 시험을 이용한 고장모드해석

### 2.1 원운동 정밀도 시험

전술한 바와 같이 공작기계의 성능을 평가하는 방법에는 여러 가지가 있다. 그 중 고속, 정밀 공작기계의 성능을 대표할 수 있는 것은 가공물의 정밀도일 것이다. KS 규격을 기준으로 한 정밀도 평가법에는 정적 정밀도와 동적 정밀도가 있는데 진직도, 평면도, 진원도, 원통도, 평행도, 직각도, 동심도, 위치결정 가공의 정밀도, 분할정밀도, 회전축의 흔들림 등이 있다. 각각에 대한 평가법과 측정장비가 있으나, 공작기계의 이송 축 상호간 직각도, 위치결정 정밀도, 반전 스파이크, 백래시나 이송 서보의 밸런스의 상위를 원호 운동에 의해 진원도를 측정하여 평가하는 원운동 정밀도 시험 방법이 공작기계의 종합적인 평가 방법으로 연구되어 ISO230-4, JIS B6194 또는 KS B4308 로 규격화되어 있다. 측정 장비로는 기준 바와 1 차원 변위계에 의한 방법, 기준 원판과 2 차원 변위계에 의한 방법, 두개의 볼 사이의 변위차를 측정하고 이를 해석하는 기구 볼바에 의한 방법이 있으며 많은 장비가 개발되어 사용되고 있다.

원운동 시험으로부터 얻어지는 NC 공작기계의 오차 특성들은 오차의 발생요인에 따라 다음과 같이 분류할 수 있으며 이러한 오차들은 각각 공작기계의 고장모드로 볼 수 있다.<sup>(2)</sup>

#### 1. 위치에 의한 오차

- 1) 기계 안내면의 기하학적 오차
  - 직교하는 두 축 사이의 직각도 오차
  - 안내면의 진직도 오차
  - 미끄럼부의 각도 운동
- 2) 위치 결정계의 오차
  - 볼스크류 혹은 위치감지 스케일의 오차
  - 스크류 구동계의 피치 오차
  - 각도 감지장치에 배열 오차
  - 백래쉬 보상

#### 2. 이송운동에 의한 오차

- 로스트 모션(lost motion)
- 스틱 슬립(stick slip)
- 위치제어 루프에 대해 부적합한 이득값 설정
- 서보 응답에 기인한 오차

- 진동
- 미끄럼부의 각도운동

원운동 시험 데이터의 오차 해석은 일반적으로 공작기계의 3 차원 작업 공간에서  $x, y, z$  세 방향으로 나타나는 오차량을 각 축의 위치 오차, 진직도 오차, 직각도 오차 등의 여러 가지 오차 성분들로 모델링하고 이들의 합으로 3 차원 입체 오차식을 구성하여 해를 구한다. 여러 타입의 공작기계에 대한 3 차원 입체오차 방정식에 대한 많은 연구가 수행되어져 왔다.<sup>(3)</sup> 원운동 시험 해석과정의 개념을 Fig. 1 에 나타냈다.

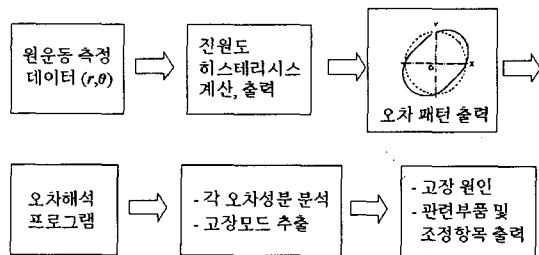


Fig. 1 Schematic diagram of circular test data analysis

### 2.2 원운동 정밀도 측정 실험과 해석

기존에 개발된 오차 해석에 관한 연구를 바탕으로 하고 본 연구에서 제작한 시험장비와 해석 프로그램을 이용하여 원운동 시험을 실시하고 데이터 해석을 해 보았다. 원운동 정밀도 측정은 기준 바와 1 차원 변위계(gap sensor) 방식을 사용하였다. 공작기계는 수직형 머시닝센터이며 실험장면을 Fig. 2 에 나타냈다.

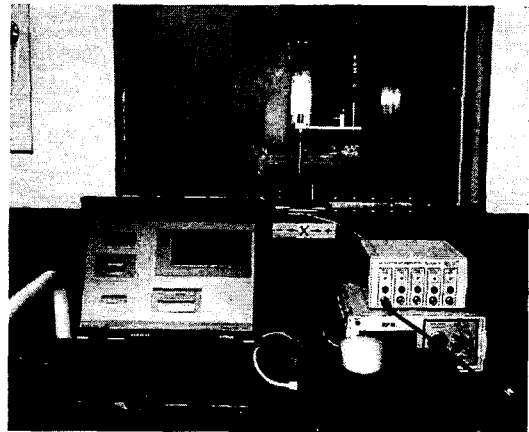


Fig. 2 Experimental setup for circular movement test

측정평면은  $X-Y$  로 하였고 원호반경은 120 mm, 이송 속도는 500 mm/min 으로 하였으며 시계방향(CW)과 반시계방향(CCW)에 대해 측정하였다.

오차 측정 결과를 Fig. 3 에 나타냈으며 분석된 진원도 오차와 히스테리시스 오차는 Table 1 과 같다.

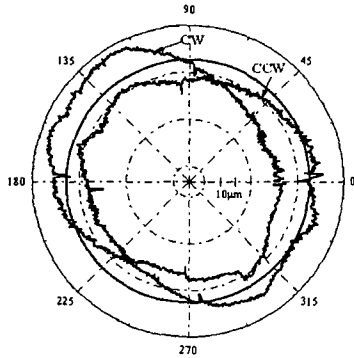


Fig. 3 Measured circular movement error signal

Table 1 Result values of circular movement error

항목	오차값 [ $\mu\text{m}$ ]	
진원도, $G$	CW	45.377
	CCW	33.229
히스테리시스, $H$	31.781	

원운동 정밀도 시험 결과로부터 오차 방정식을 이용해 각 오차의 성분을 분석하였으며 그 결과를 Table 2 에 나타냈다.

Table 2 Analysis result of each error

오차 항목	오차값 [ $\mu\text{m}$ ]	백분율 [%]
$x$ 방향 위치오차	32.026	40.74
$x$ - $y$ 평면 직각도 오차	14.789	18.81
$y$ 방향 위치오차	14.129	17.97
$y$ 에 대한 $x$ 방향 lateral play 오차	6.398	8.14
$x$ 에 대한 $y$ 방향 lateral play 오차	5.494	6.99
$y$ 방향 백래쉬 오차	2.272	2.89
$x$ 방향 백래쉬 오차	1.860	2.37
$y$ 에 대한 $x$ 방향 진직도 오차	0.298	0.38
$x$ 에 대한 $y$ 방향 진직도 오차	0.284	0.36

계산된 오차량만큼 NC 컨트롤러에서 보정하여 오차를 줄이는 것도 중요하지만 그보다는 오차의 원인과 관련된 공작기계의 부품 및 서브시스템을 찾아내어 조정항목을 선정하고 신뢰성 관리 항목의 순위화를 가리는 것이 공작기계의 정밀도 향상을 위한 근원적인 접근 방법이다. 앞에서 검출된 오차의 원인과 관련부품을 조사하여 Table 3 에 나타냈다. 관련 부품과 고장모드 명칭은 고장모드 데이터 베이스인 FMD97 을 참고하였다.

Table 3 Cause of each error and related parts

오차	고장부품 / 고장모드
Scaling error	Ball screw / overheating, pitch error Axis tape / tensioned
Squareness	Axis / misalignment, bent Guideway / worn
Straightness	Guideway / bent, misalignment
Backlash	Ball screw / excessive windup, worn Guideway / worn
Lateral play	Guideway / looseness
Stick slip	Guideway bearing / worn, lack of lubrication
Cyclic error	Encoder / eccentric Ball screw / eccentric
Reversal spikes	Servo-motor / inadequate torque inadequate response time
Servo mismatch	Servo loop gains / mismatched

원호 가공물의 반경 측정 데이터와 같은 다른 임의의 방법과 장비를 이용해 측정된 데이터라도 누구나 해석할 수 있도록 웹 상에서 구동 되는 오차해석 프로그램도 개발하였다. 몇 가지 측정 파라미터들을 입력하고 측정 데이터 파일을 입력하면 앞에서 나타낸 결과들을 출력해준다. 프로그램 화면의 일부를 Fig. 4 에 나타냈다.

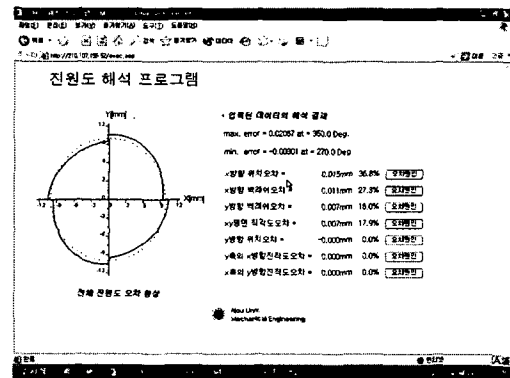


Fig. 4 Web service program for circular test data analysis

### 3. 주축 진동시험을 이용한 고장모드해석

#### 3.1 공작 기계의 진동 시험

KS 규격의 “공작기계의 진동 검사 방법”에 따르면 정지, 무부하 운전, 부하 운전, 테이블 운전 시 공작기계의 주축대나 테이블의 진폭, 진동수 및 가속도를 측정하여 분석하도록 되어 있다. 공작기계는 작동 시 여러 가지 원인에 의하여 진동이나 소음이 발생하게 되고 이로 인해 가공 정밀도가 떨어지며 공작기계의 성능 저하를 가져온다. 공작기계

에 발생하는 진동은 크게 자려진동(self-excited vibration)과 강제진동(forced vibration) 두 가지로 나눌 수 있는데, 이 중 밸런스 이상, 베어링 결함, 기어 손상과 같은 공작기계 부품의 고장으로 인한 진동은 강제진동의 형태로 나타난다. 주축대의 진동은 대표적인 회전체의 진동 문제로서 측정된 진동 신호가 가지고 있는 여러 가지 주파수 성분들을 분석하면 고장난 공작기계 부품을 유추해 낼 수 있으며 이를 고장모드분석과 접목할 수 있다.

### 3.2 주축 진동 측정 실험과 해석

주축대의 진동 측정 데이터 해석에 대한 흐름도는 Fig. 5 과 같다.

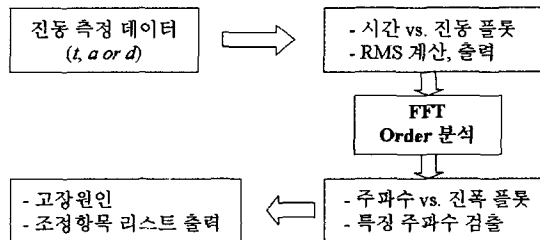


Fig. 5 Schematic diagram of vibration data analysis

각 주파수 성분들과 관련된 고장 원인과 공작기계 부품들간의 관계를 Table 4 에 정리하였다.<sup>(4)</sup> 고장 부품 및 고장모드의 명칭은 고장모드 데이터베이스 인 FMD97 의 자료를 참고로 하였다.

Table 4 Cause of each frequency component and related parts of machine tool

특정 주파수	원인	고장부품 / 고장모드
1X	불평형	Spindle / out of balance
1X, 2X, 3X	정렬불량	Spindle / misalignment
1X, 2X	축굽힘	Shaft / bent
1X, 2X	로터 크랙	Shaft / crack
1X, harmonics	부품 느슨함	Parts / looseness
2X	로터 비대칭	Shaft / asymmetric
High freq.	베어링 마모	Roller bearing / worn
0.35~0.47X	유막베어링	Fluid film bearing / worn

가속도계를 주축대의 X, Y방향에 부착한 후 무부하 회전 시 가속도를 측정하여 이를 분석할 수 있도록 하였다. 회전 속도를 검출하여 회전 속도에 근거한 주요 주파수 성분들을 검출해 그 크기를 출력함으로써 고장원인을 쉽게 유추하도록 하였다. 해석 결과 화면을 Fig. 6 에 나타냈다. 전체 진동 신호 중 1X 성분이 대부분 차지하고 있으므로 축의 불평형이 고장원인이며 밸런싱이 필요함을 알 수 있다.

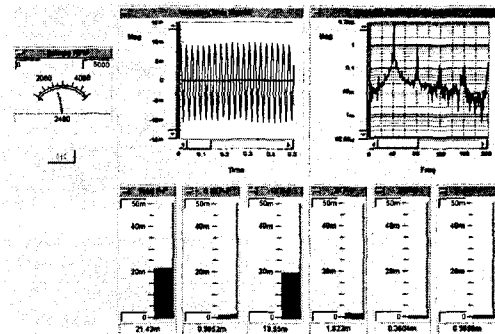


Fig. 6 Result of vibration data analysis

## 4. 결론

본 연구에서는 공작기계의 신뢰성 평가 관점에서 공작기계의 성능 시험 데이터를 이용한 고장모드해석에 대해 연구하였다. 여러 성능 시험 중 먼저 원운동 정밀도 시험과 주축 진동 측정 시험을 통한 공작기계의 오차 또는 고장모드와의 상관관계에 대해 연구하였고 간단한 측정 시스템과 해석 프로그램을 개발하였다. 원운동 및 진동시험 데이터의 해석을 통해 공작기계 부품 중 취약한 부분을 찾아내고 이를 신뢰성 해석과 연계 시킨다면 공작기계 신뢰성 평가에 중요한 정보를 제공해주게 될 것이다. 아직까지는 각 오차들과 부품의 고장모드에 대한 세부적인 상관관계가 많이 확보되지 않았지만 공작기계 설계자와의 지속적인 협의를 통하여 보완해 나갈 것이며 다른 성능 시험도 추가하여 연계해 나갈 예정이다.

## 후 기

본 연구는 산업자원부의 중기거점기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었음.

## 참고문헌

1. 이수훈, 김종수, 송준엽, 이승우, 박화영, "공작기계 부품의 고장 데이터 해석 및 데이터베이스 프로그램 개발," 한국공작기계학회 추계학술대회, 2001.
2. 박준호, "NC 공작기계 컨투어 운동 정도의 해석," 대한기계학회지, 제 32 권, 제 5 호, 1992.
3. 문준희, 박희재, 주종남, "기구불바를 이용한 가공기계의 정밀도 평가 및 향상 기술 개발," 한국정밀공학학회지, 제 13 권, 제 6 호, 1996.
4. F. F. Ehrich, "Handbook of Rotordynamics," McGRAW-Hill, 1992.