

공작 기계의 신뢰성 평가를 위한 웹 기반 해석 프로그램 개발

강태한*, 김봉석+, 이수훈++, 송준엽+++, 강재훈+++

Development of a Web-based Analysis Program for Reliability Assessment of Machine Tools

Tae-Han Kang*, Bong-Suk Kim+, Soo-Hun Lee++, Jun-Yeob Song+++, Jae-Hun Kang+++

Abstract

Web-based analysis programs for reliability assessment of machine tools were developed in this study. First, the reliability data analysis program was developed to search for failure rate using failure data and reliability test data of mechanical part. Second, failure mode analysis was developed through performance tests like circular movement test vibration test for machine tools. This analysis program shows correlation between failure mode and performance test result. Third, tool life was predicted by correlation between flank wear and cutting time, using the extended Taylor tool life equation in turning data and the equivalently converted equation in order to apply ball endmill data to Taylor tool life equation in milling data. All the information related to input and result data can be stored in theses programs.

Key Words : Machine tool (공작기계), Failure mode (고장모드), Reliability (신뢰성), Probability distribution (확률분포), Circular movement test (원운동시험), Vibration (진동), Tool life(공구수명), Tool wear(공구마모)

1. 서론

신뢰성(reliability)이란 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. 공작기계 시스템은 수많은 기계와 전자 부품으로 구성되어 있으며 개개의 부품이 서로 연계되어 전체 시스템의 기능을 발휘하게 되므로 각 부품의 신뢰성이 전체 시스템의

신뢰성을 결정하는 중요한 요소가 된다.

기계류의 경우 신뢰성의 여러 평가기법 중 고장이 발생하는 횟수가 상대적으로 적고 고장의 구분이 불명확한 경우가 많아 부품에 발생 할 수 있는 고장의 형태와 그 고장으로 인한 시스템의 영향을 분석하는 고장모드영향분석법(FMEA)을 이용한 신뢰성 평가가 연구되고 있다.^(1,2) 기계시스템의 신뢰성 평가 및 예측을 위하여 기존의 신뢰성 자료를 활용할 수도 있지만 국내의 경우 이에 대한 자료가 거의 전무한 실정이고 따라서 신뢰성 시험이나 현장의 고장 이력데이터 등을 이용

* 주저자, 아주대학교 대학원 기계공학과 (kangthth@hotmail.com)
주소: 443-749 경기도 수원시 영통구 원천동 산5번지
+ 아주대 대학원 기계공학과
++ 아주대 기계공학부
+++ 한국기계연구원

하여 고장율이나 평균고장시간을 예측하여야만 한다.

본 연구에서는 동작기계의 신뢰성평가를 위하여 고장 이력 데이터가 있는 경우 고장율이나 평균고장시간을 추출하는 웹 프로그램을 개발하였고, 고장 이력데이터 확보가 어려울 때 동작기계의 성능평가나 주축 진동 측정 시험을 이용하여 고장 모드를 예측하는 웹 기반 해석 프로그램을 개발하였다. 또한 생산 공정에서 경제적인 측면에서 큰 비용을 차지하고 제품의 품질과 생산성에 직결된 공구수명에 대한 예측 프로그램을 개발하였다. 프로그램들과 관련된 모든 정보는 데이터베이스화 되도록 하였다. 개발된 프로그램의 관련부품과 고장모드의 명칭은 표준화를 위하여 선행 연구된 머시닝센터의 분류도를 바탕으로 고장모드 데이터베이스인 FMD-97을 참고하였다.^(2,3)

2. 고장데이터 분석

2.1 고장분포함수

고장데이터를 이용하여 고장율이나 평균고장시간과 같은 신뢰성 지표를 알기 위해서는 먼저 여러 가지 고장분포함수를 사용하여 고장율 함수를 추정하여야 한다. 고장데이터를 입력하면 하나의 데이터군을 신뢰성 분석에서 주로 쓰이는 지수분포, 와이블분포, 대수정규분포로 모델링 한 후 각 모수를 추정하게 된다. 각 분포 함수들의 신뢰도 함수와 고장율 함수를 Table 1에 나타내었다.⁽⁴⁾ 기계 부품류의 경우 고장이 일어나기까지의 시간이 길고 현장 데이터의 확보가 어려워 단지 몇 개의 한정된 데이터를 가지고 고장율 함수를 예측하여야 하므로 신뢰도 높은 확률분포함수를 선정하는 것이 중요하다.

Table 1 Reliability and failure rate functions

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	$\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \int_t^\infty \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt$	$\frac{\frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}}}{\int_t^\infty \frac{1}{t} e^{-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}} dt}$

2.2 고장데이터 분석 프로그램

본 연구에서는 웹상에서 동작기계 부품의 고장 이력데이터 또는 신뢰성 시험 데이터를 입력하여 누구나 신뢰성 데이터

분석을 할 수 있도록 ASP(Active Server Pages)로 프로그래밍 되어지고, 또한 관련된 모든 자료들을 데이터베이스화할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 개발된 신뢰성 데이터 해석 프로그램은 기계부품을 선택한 후 고장데이터와 고장모드를 입력하면 여러 확률분포에 대한 해석을 수행하고 그 결과들을 보여준 후 가장 최적의 고장분포함수를 선택한다.

고장 해석 프로그램은 크게 세 가지로 구성되어있다. [고장분포 해석]은 동작기계의 서브시스템과 입력하려는 부품을 선택하고 데이터 수를 지정한 후 가지고 있는 고장 이력데이터나 신뢰성 시험 결과를 입력하면 각 확률분포의 모수 추정결과와 평균고장시간, 경고사용시간, 오차 등이 Fig. 1과 같이 출력된다. [고장모드 빈도분석]은 축적된 데이터베이스로부터 검색된 부품의 고장 빈도수와 고장모드별 히스토그램을 Fig. 2와 같이 출력해 준다.

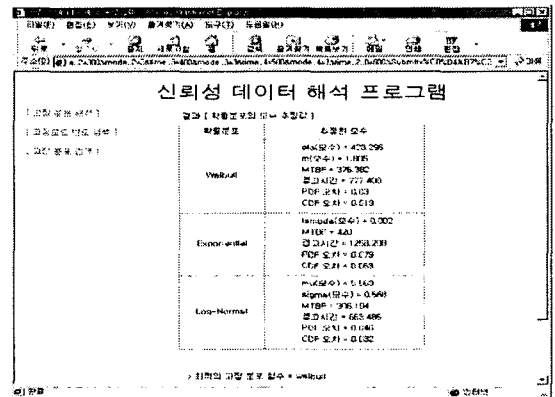


Fig. 1 Analysis result of failure data

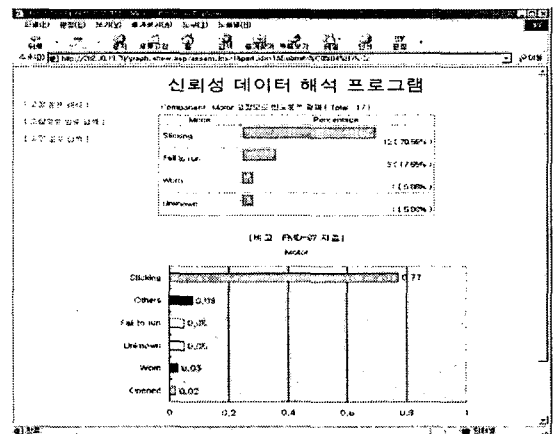


Fig. 2 Failure mode frequency histogram

[고장 분포 검색] 메뉴에서는 저장된 데이터베이스로부터 알고자 하는 부품의 고장분포함수를 검색할 수 있다. 같은 부품의 고장율이라도 고장모드별로 이를 나타내는 고장분포함수가 다를 수 있기 때문에 고장모드별로도 고장분포함수를 검색할 수 있도록 하였다.

3. 원운동 시험을 통한 고장모드해석

3.1 원운동 정밀도 시험

가공물의 정밀도는 공작기계의 성능을 평가하는 대표적인 방법으로 정밀도 평가에는 각각에 대한 평가법과 측정 장비가 있으나 원운동 정밀도 시험 방법이 공작기계의 종합적인 평가 방법으로 연구되어 ISO230-4, JIS B6194, KS B4308 등으로 규격화되어 있다. 원운동 시험으로부터 얻어지는 NC 공작기계의 오차 특성들은 오차의 발생요인에 따라 분류할 수 있으며 이러한 오차들은 각각 공작기계 시스템이나 부품의 고장모드가 된다.⁽⁵⁾ 기준에 개발된 오차 해석에 관한 연구를 바탕으로 하고 본 연구에서 제작한 시험장비와 해석 프로그램을 이용하여 원운동 시험을 실시하고 데이터 해석을 하였다. 원운동 정밀도 측정은 기준 바와 1차원 변위계(gap sensor) 방식을 사용하였다. 공작기계는 수직형 머시닝센터이며 실험장면을 Fig. 3에 나타냈다.

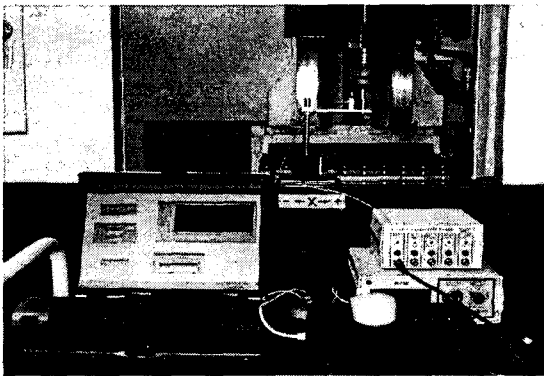


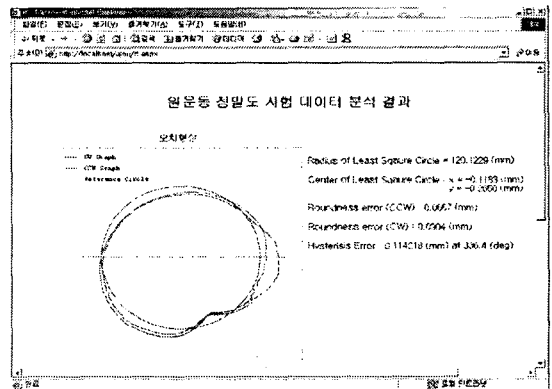
Fig. 3 Experimental setup for circular movement test

3.2 원운동 데이터 고장모드해석 프로그램

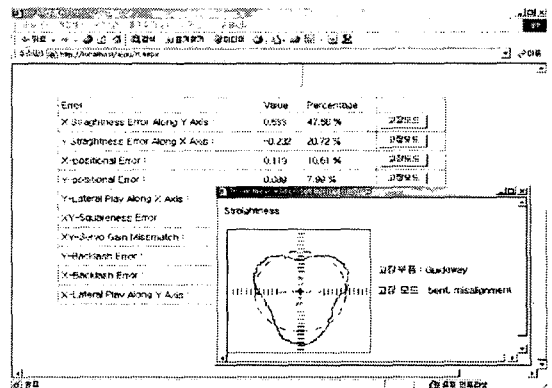
공작기계의 정밀도 향상을 위하여 계산된 오차량 만큼 NC 컨트롤러에서 보정하여 오차를 줄이는 것도 중요하지만 그보다는 오차의 원인과 관련된 공작기계의 부품 및 서브시스템을 찾아내어 조정항목을 선정하고 신뢰성 관리 항목의 순위화를 가리는 것이 보다 근원적인 접근 방법이다.

Table 2 Cause of each error and related parts

오 차	고장부품 / 고장모드
Scaling error	Ball screw / overheating, pitch error Axis tape / tension
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 / mismatch



(a)



(b)

Fig. 4 Result of program for circular test data analysis

원운동 정밀도 시험결과와 분석으로 알 수 있는 각종 오차와 관련된 고장부품 또는 고장모드를 Table 2에 나타내었다. 원호 가공물의 반경 측정 데이터와 같은 다른 임의의 방법과 장비를 이용해 측정된 데이터도 인터넷에서 해석할 수 있는 웹 기반 오차해석 프로그램을 개발하였다. 프로그램의 결과화면은 Fig. 4와 같고 굽힘이나 정렬불량 고장모드를 갖는 Guideway가 고장부품으로 판별되었다. 원운동 패턴과 진원도 결과들을 출력하고 각 오차 항목을 순위화하여 나타내주며 관련된 고장모드/부품을 검토할 수 있도록 하였다. 이 모든 정보는 프로그램을 통하여 데이터베이스에 저장되도록 하였다.

4. 주축 진동시험을 통한 고장모드해석

4.1 주축 진동 측정

KS 규격의 "공작기계의 진동 검사 방법"에 따르면 정지, 무부하 운전, 부하 운전, 테이블 운전 시 공작기계의 주축이나 테이블의 진폭, 진동수 및 가속도를 측정하여 분석하도록 되어있다. 공작기계는 작동 시 여러 가지 원인에 의하여 진동이나 소음이 발생하게 되며 이로 인해 가공 정밀도가 떨어지고 공작기계의 성능 저하를 가져온다.

본 연구에서 사용한 주축 진동 측정 시험 장비는 Fig. 5와 같고 주축의 X, Y방향에 가속도계를 장착한 후 무부하 회전 시 각 회전속도에 따른 주축 진동을 측정하였다.

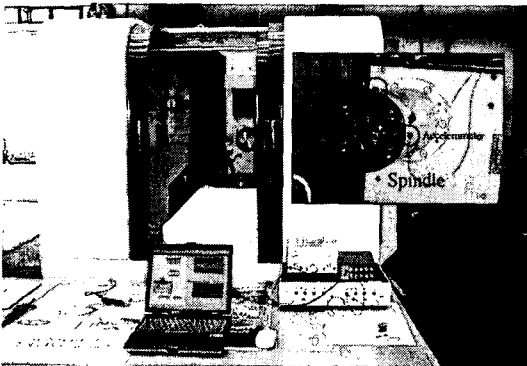


Fig. 5 Experimental setup for spindle vibration test

4.2 고장모드 결정을 위한 알고리즘

진동신호의 각 주파수 성분들과 이와 관련된 고장 원인이거나 공작기계 부품들 간의 관계를 정의하였고,^(6,7) 시험데이터에서 특징 주파수를 추출하여 고장모드를 판별하는 알고리즘은 현상마다의 특징 파라미터를 이용하여 판별논리를

가지 분할 논리형식으로 정리하여 계단적으로 판단을 진행하는 Fig. 6의 Decision tree법을 이용하였다.⁽⁸⁾ Decision tree법을 이용하여 정확한 결과를 얻기 위해서는 회전 주파수, 위험속도, 위상변화 등의 데이터가 있어야 하지만 위험속도, 위상변화 등을 사용자가 직접 산업현장(field)에서 측정하기가 어려우므로, 본 연구에서는 진동데이터와 회전 주파수를 이용하여 고장모드를 결정하였다.

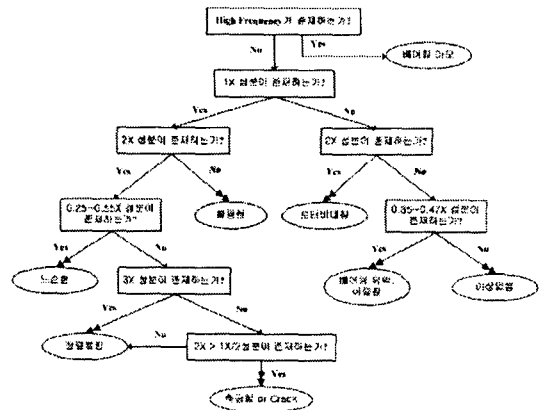


Fig. 6 Decision tree for vibration diagnostics

4.3 주축 진동 시험데이터 해석 프로그램

데이터 수, 샘플링 주파수, 회전속도와 같은 실험 정보를 입력하고 측정 데이터를 불러오면 FFT 결과, 각 주파수 성분의 크기, Decision tree를 통해 구한 고장부품/고장모드를 출력해 준다. 프로그램의 해석 결과화면은 Fig. 7과 같고 주파수 분석 결과 베어링 마모로 판별되었다. 이 모든 정보는 프로그램에서 데이터베이스로 구축된다.

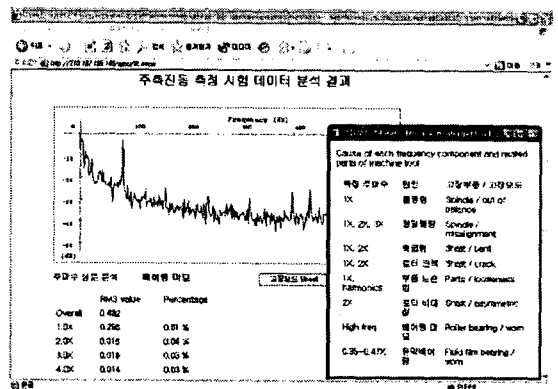


Fig. 7 Web program for vibration test data analysis

5. 공구 수명 예측 프로그램

5.1 선삭에서의 공구 수명식

1907년 Taylor에 의해 처음으로 발표된 공구 수명식은 $VT^n = C$ 이며 공구 수명은 절삭 속도의 증가에 따라 감소함을 보여준다. 여기에, 이송속도(f), 절삭 깊이(t)를 고려하면 다음과 같은 공구 수명식을 얻을 수 있다.⁽⁹⁾

$$VT^n t^b f^a = C \quad (1)$$

5.2 엔드밀에서의 공구 등가변환 수명식

단속 절삭작용이 이루어지는 부분의 가공 궤적을 2차원적으로 임의의 평면상에 모델링하면 선삭 가공에서의 경우와 유사하게 형성되는 것으로 알려져 있다. 이를 바탕으로 공구의 날 끝부분에 대하여 단순화하고 기하학적인 선삭 가공 모델로 등가 변환하여 정상 절삭과정에서의 해석을 할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 볼 엔드밀 가공공정은 Fig. 8과 같고, 여기에서 DOC는 절삭 깊이량, LOC는 절삭 길이량을 나타낸다.

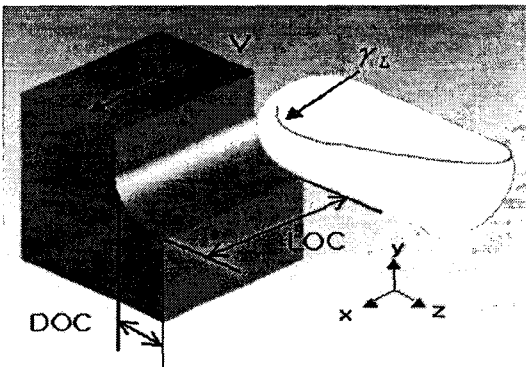


Fig. 8 Ball-endmill mechanism

밀링가공은 공작물의 이송속도와 절삭 깊이량 및 공구회전속도의 가공조건으로 이뤄지며 이에 대한 등가해석용 변수로 변환하였다. 등가절삭 깊이량은 식 (2)와 같다.

$$A'_{doc} = r_n \left(\pi - \phi + \sin^{-1} \left(\frac{f}{2r_n} \right) \right) + w_2 \quad (2)$$

등가해석을 위한 공구 1회전당의 이송량인 f' 는 식 (3)과 같고 등가해석을 위한 절삭속도인 V_T 는 식 (4)과 같다.

$$f' = f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \quad (3)$$

$$V_T = \frac{D_{eff} \times \pi \times rpm}{1000} \quad (4)$$

따라서, 식 (1)의 공구 수명 확장식에 등가 절삭 깊이량, 등가 이송량, 등가 절삭속도 수식을 대입하면 식 (5)와 같은 공구 수명 등가변환식을 얻게 된다.

$$V \cdot T^n \left\{ r_n \left(\pi - \phi + \sin^{-1} \left(\frac{f}{2r_n} \right) \right) + w_2 \right\}^b \cdot \left\{ f \times \frac{A_{doc}}{A'_{doc}} \right\}^a = C \quad (5)$$

플랭크 마모를 통한 공구 수명 예측을 위하여 공구 수명식을 확장하였다. 등가 변환시킨 공구 수명 확장식의 수명지수를 구하기 위하여 K사 고속용 볼 엔드밀 공구를 이용하여 Lau, W.S.⁽¹¹⁾가 수행하였던 실험방법을 이용하였다. 절삭 조건과 실험 결과를 간략하게 Table 3에 표시하였다.

수명지수 n 값은 초경합금의 경우 보통 0.12~0.25인데 본 연구에서는 평균값인 0.2를 사용하였고 볼 엔드밀의 헬리컬 각도는 30°이다. 실험데이터 해석 결과 얻어진 수명지수는 $n=0.2$, $a=0.122$, $b=0.35$, $c=835$ 이다.

Table 3 Cutting condition and Experimental data

공구경 (mm)	Ad (mm)	F (mm/rev)	공구수명 (0.1mm기준)
6	0.9	0.12	67분
6	0.9	0.15	58분
6	0.9	0.2	36분
6	0.9	0.12	67분
6	1.4	0.12	48분
6	2.5	0.12	39분

5.3 공구 수명 예측 프로그램 개발

공구수명 예측 프로그램은 인터넷으로 접속하여 웹상에서 데이터를 입력하고 결과를 볼 수 있도록 ASP(Active Server Pages)를 사용하여 프로그래밍 하였으며 누구나 쉽게 사용할 수 있다. 공구 수명 예측 프로그램의 결과 화면은 Fig. 9와 같다. 원하는 가공 절삭 조건을 입력하면 공구수명을 그래프화시켜 사용자에게 보여준다.

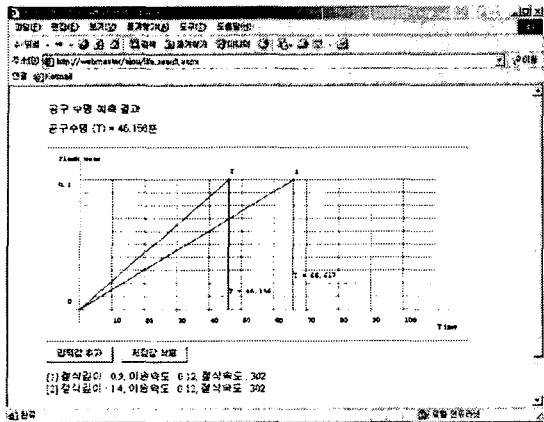


Fig. 9 Result of web program for tool life

6. 결론

본 연구에서는 공작기계의 신뢰성 평가를 위하여 다음의 세 가지 방법으로 연구를 수행하였다. 첫 번째로 공작기계 부품이나 제품의 고장이력 데이터 또는 신뢰성시험 데이터를 이용하여 최적의 고장분포함수를 선정하여 고장율이나 평균고장시간을 예측하는 프로그램을 개발하였다. 두 번째로 고장이력데이터 확보가 어려운 실정에서 유용하게 이용할 수 있도록 공작기계의 성능시험을 고장부품/고장모드와 연계하는 방법을 연구하였다. 여러 성능시험 중 원운동 정밀도 시험과 주축 진동 측정 시험을 통해 측정된 시험 데이터를 분석하여 이와 연계된 고장부품/고장모드를 판별하는 프로그램을 개발하였다. 세 번째로 생산시스템에서 경제적인 측면에서 가장 중요 요인 중 하나인 공구 마모에 대한 연구를 수행하였다. 측정된 공구 마모 데이터를 이용하여 공구 수명을 알아내고 변화되는 가공조건하에서의 공구 수명을 예측할 수 있다. 이 모든 프로그램은 모든 사용자가 이용할 수 있도록 웹상에서 구동되며 관련된 모든 정보들은 데이터베이스로 구축되도록 하였다.

이러한 일련의 신뢰성 데이터 해석 작업과 데이터베이스화는 공작기계에서 뿐만 아니라 일반 기계류 신뢰성 설계와 평가시에 중요한 정보를 제공해 주게 될 것으로 기대되며, 향후 데이터가 많이 축적되면 NPRD-95와 FMD-97과 같은 외국의 상용 데이터베이스와 견줄 수 있는 국내 기계부품에 대한 신뢰성 데이터베이스가 도출될 것으로 예상된다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기저점기술개발사업의 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) Yiqiang Wang and Yazhou Jia, 1999, "Failure Probabilistic Model of CNC Lathes," *Reliability Engineering and System Safety*, Vol. 65.
- (2) 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 Korea Society of Precision Engineering*, Vol. 18, No. 6, pp. 74-79.
- (3) Reliability Analysis Center, 1997, *Failure Mode / Mechanical Distribution*.
- (4) Korean Standards Association, 1992, *"The Distribution and Statistics of Reliability."*
- (5) Park, J. H., 1992, "Accuracy of Contour Motion in NC Machine Tool," *Journal of the Korea Society of Mechanical Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 441-455.
- (6) Ehrich, F. F., 1992, *"Handbook of Rotordynamics,"* McGRAW-Hill, pp. 4.1-4.85.
- (7) Rao, J. S., 1996, *"Rotor Dynamics,"* New Age International, pp. 391-429.
- (8) Yang, B. S., Park, C. H., and Kim, H. J., 2000, "An Efficient Method of Vibration Diagnostics for Rotating Machinery Using A Decision Tree," *International Journal of Rotation Machinery*, Vol. 6, No. 1, pp. 19-27.
- (9) Whan Choi, 1987, *"A Study on the Tool Life Constantin Tool Life Equation."*
- (10) Cheol-Won Song, 2003 *"A Study on the Prediction of Maching Temperature and Cutting force in Ballend Milling process."*
- (11) W.S. Lau, P.K. Venuvinod and C. Rubenstein, 1979, *"The Relation between Tool Geometry and the Taylor Tool Life Constant."*