

## 공작기계 핵심부품의 신뢰성 평가·분석에 관한 연구

이 승 우\*, 송 준 엽\*, 이 화 기\*\*

\* 한국기계연구원 지능형정밀기계연구부  
\*\* 인하대학교 산업공학과

### A Study of Reliability Evaluation and Analysis for Core Units of Machine Tools

Seung Woo Lee\*, Jun Yeob Song\*, Hwa Ki Lee\*\*

\* Intelligence & Precision Machine Department, KIMM  
\*\* Department of Industrial Engineering, INHA University

#### Abstract

Recently, the reliability evaluation and analysis are applied for many industrial products, and many products are required to guarantee in quality and in efficiency. The purpose of this paper is to present some of reliability prediction methodologies that are applicable to machine tools. Especially ATC (Automatic Tool Changer) and Interface Card of PC-NC, which are core components of the machine tools, were chosen as the target of the reliability evaluation and analysis. The results of this research has shown the failure

rate, MTBF(Mean Time Between Failure), and reliability for those components. It is expected that proposed methodologies will be applicable to evaluation of reliability for other industrial products.

## 1. 서론

지금까지 방산 혹은 전자산업 분야에서 사용자가 요구하는 성능에 대한 평가(품질)척도로서 신뢰도가 활용되고 있고, 이러한 추세는 그 동안 이러한 기술이 등한시 되어 온 기계 산업, 공작기계 분야에 까지 영향을 미쳐 단순한 생산·안전계수를 바탕으로 한 기존의 설계/생산에서 설계단계부터 신뢰성 개념을 도입시키는 환경변화를 직시하고 있다.

국내에서 개발된 국산화 제품이 외국에서는 물론 국내에서조차 사용을 기피하는 가장 큰 이유 중의 하나는 국산 개발제품의 신뢰성에 대한 불확실성(uncertainty)때문이다. 일반적인 제품 개발 과정은 시장요구에 따른 제품 사양을 결정하고 설계, 제작 및 조립 과정을 거쳐 내구, 환경, 가속 및 성능 등의 각종 시험을 수행한다. 이러한 과정 중에서 나오는 각종 기술적인 문제점을 보완하는 피드백 사이클(feedback cycle)을 거친 후에야 양산설계가 이루어지고 이를 바탕으로 대량생산에 착수한다[7].

그러나 국내의 대부분 기계제작 업체들은 규정검사를 거치지 않고 단순히 개략적인 시험을 하거나 검사를 하더라도 과학적인 절차에 따른 데이터가 아니기 때문에 수요자의 입장에서 시험 데이터를 믿지 못하고 이는 제품의 신뢰성에 까지도 영향을 미치게 된다.

특히, 공작기계와 같은 기계시스템 및 구조물은 개개 부품의 기능이 서로 연관되어 전체 시스템의 기능을 발휘하게 되며 시스템을 구성하는 각 부품의 신뢰성이 곧 전체 시스템의 신뢰도를 결정하게 된다[1]. 공작기계 제품의 향후 발전방향은 고속, 고품질, 고신뢰성 시스템을 추구하고 있으며 개발된 시스템의 신뢰성을 향상시키기 위해서는 개발된 제품에 대한 신뢰성을 평가하고 신뢰성 향상을 위한 분석기법 및 분석된 데이터를 피드백 하여 제품생산에 적용할 수 있는 체계가 구축되어야 한다.

신뢰성 예측을 위한 방법으로는 FMEA(Failure Mode & Effect Analysis), FTA (Fault Tree Analysis), Worst Case Analysis, 고장률 데이터베이스 사용법 및 A/S 데이터 사용 등이 있다. 그러나 기계류 부품의 경우 전자류 부품에 비해 고장모드 등의 정의가 정확하지 않고 제조업체에서 A/S 데이터를 공개하는 것을 꺼려하기 때문에 가장 접근이 용이한 고장률 데이터베이스를 이용한 신뢰성 예측방법을 본 연구에서는 사용하였다.

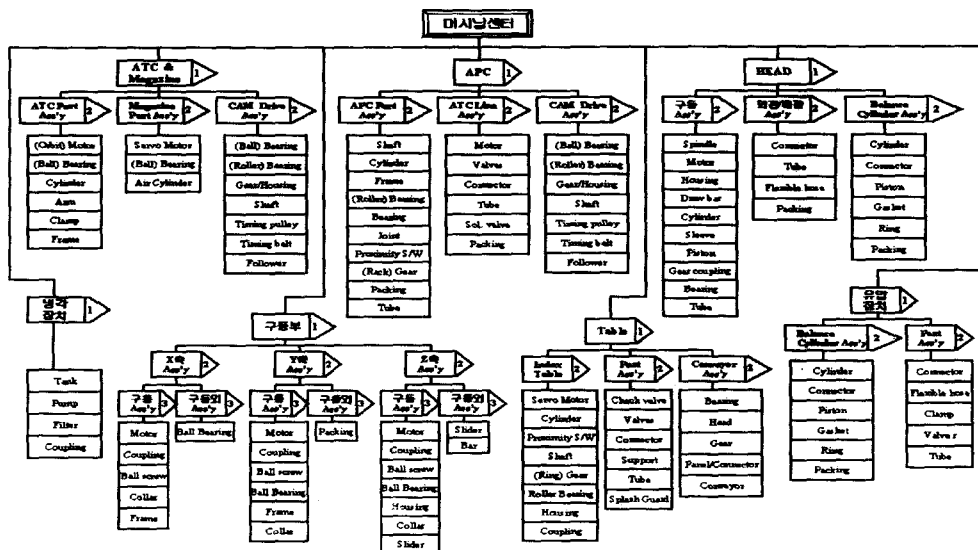
본 논문에서는 공작기계를 대표하는 머시닝센터를 대상으로 구성부품, 서브 유니트의 고장모드 사례를 분석하고, 시스템의 신뢰도에 크게 영향을 미치는 ATC (Automatic Tool Changer)와 PC-NC의 인터페이스 카드에 대해 예측작업을 실시/적용한 사례를 소개한다.

## 2. 머시닝센터의 고장모드 조사·분석

머시닝센터는 복잡한 형상의 제품을 높은 정밀도로 가공하며, 여러 종류의 공구를 자동으로 교환해 가면서 순차적으로 정면 및 홈 가공, 구멍 뚫기, 보링 가공, 나사 절삭 등을 효율적으로 수행하는 복합공작기계이다.

머시닝센터의 신뢰성을 예측하기 위해서 전체 시스템을 단계별 서브시스템과 최하위 단계인 구성부품까지 분류하는 것이 필요하다. 일반적으로 서브시스템을 분류하는 방법으로는 구성부품 관점의 분류방법과 기능적 관점의 분류방법이 있는데, 본 논문에서는 현재 판매되고 있는 머시닝센터의 파트리스트(Part List)와 설계도를 기본으로 구성부품의 관점에서 시스템을 분류하였다. 구성부품의 관점은 할당된 기능에 따라 2~3개의 서브시스템이 중복되어 분류되는 불합리한 점도 있으나 외형상 구분이 용이하여 쉽게 분류할 수 있는 장점이 있다[4].

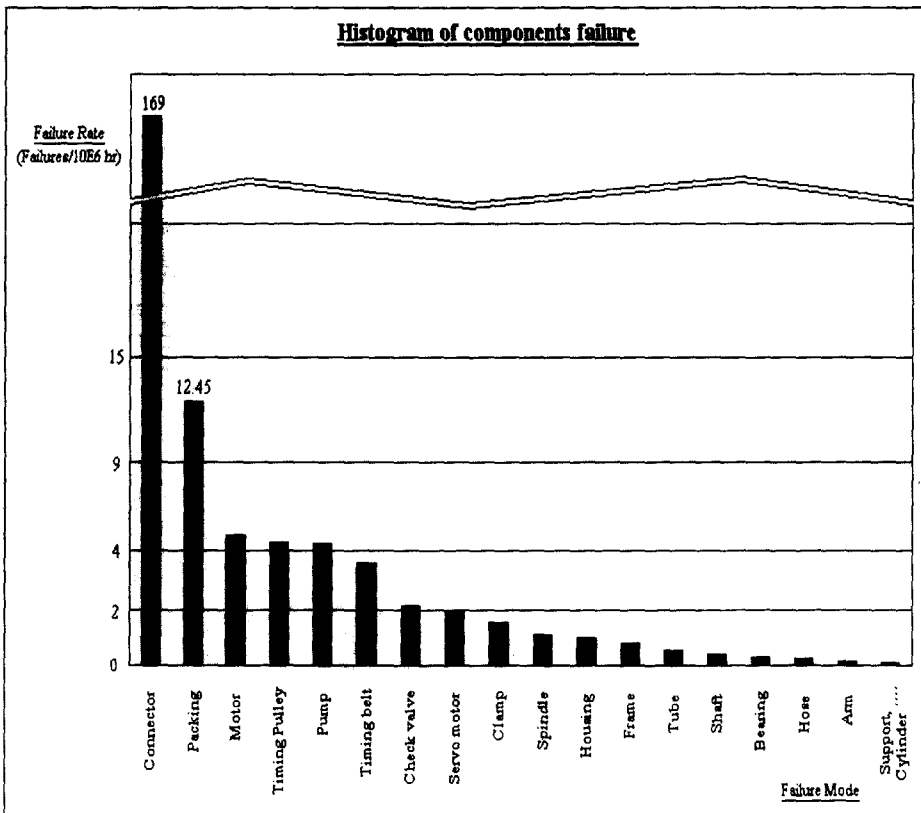
머시닝센터의 서브시스템은 Magazine & ATC, APC(Automatic Pallet Changer), 주축(HEAD), 구동부, 테이블, 유압장치, 냉각장치, 컬럼 및 베드 그리고 제어장치의 모두 9개로 분류할 수 있다. 전체 시스템에서 분류된 9개의 1차 서브시스템 중 컬럼 및 베드와 제어장치를 제외한 7개의 서브시스템과 하위레벨 구성부품의 분류도를 <그림 1>에 나타내었다. 컬럼 및 베드는 고장성을 유지하므로 고장이 거의 없고 제어장치(NC부)는 제어장치만을 전체시스템으로 본 전자 장비이기 때문에 별도로 구분하였다.



<그림 1> 머시닝센터의 분류도

기계시스템의 구성 부품에 대한 고장률 데이터, 즉 시험 및 평가에 의한 시험데이터와 고장 및 수리·교체이력의 현장데이터가 국내에는 전무한 실정이기 때문에 머시닝 센터의 고장모드를 획득하기 위하여 외국에서 발표된 신뢰성 데이터베이스인 NPRD 95(Non-electronic Parts Reliability Data)와 FMD 97(Failure Mode Distributions)의 고장률과 고장모드 등을 이용하였다[10]. 그러나 모든 구성부품 고장률과 고장모드를 얻을 수 없었고, 이 중 머시닝 센터와 사용 환경이 유사한 고장률 데이터를 중심으로 20개의 데이터를 확보할 수 있었다. <그림 2>는 20개의 구성부품 고장률을 순위화하여 히스토그램으로 도식화한 것으로 커넥터, 모터, 펌프, 타이밍벨트, 체크밸브, 클램프, 스피indle 등이 고장이 일어날 확률이 높은 것으로 나타났다.

일반적으로 한 부품에서의 고장은 여러 가지 형태로 발생한다. 부품에서 일어날 수 있는 고장의 형태와 그 빈도수를 분석하는 것이 고장모드 분석인데, <표 1>은 머시닝센터의 매뉴얼, NPRD95 및 FMD97의 데이터를 참조해 분석한 구성부품 일부에 대한 고장모드 분석의 예이다. 모달 고장모드 확률은 고장률과 고장모드확률의 곱으로 나타내며, 빈도수와 고장 등급을 가중치로 부여하면 FMECA(Failure Mode and Effect Criticality Analysis) 방법으로 확대할 수 있다.



<그림 2> 머시닝센터 구성부품의 고장률 순위

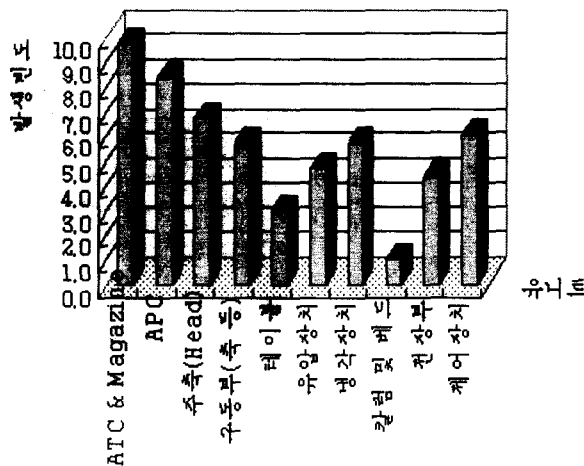
<표 1> 머시닝센터 구성부품의 고장률과 고장모드 분석 - 일부

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
Motor	4.50	Sticking	.77	3.47
		Fail to Run	.05	.225
		Worn	.03	.135
		Opened	.02	.090
		Others	.08	.360
		Unknown	.05	.225

고장모드 해석결과의 타당성 검토를 위해 실제 현장에서 발생하는 고장데이터와 연계를 통해 확인하였다. 한국공작기계협회에서 국내 공작기계 제조사를 상대로 신뢰성 및 A/S 관련 자료를 조사한 결과에는 <그림 3>에 나타낸 것 같이 Magazine & ATC, APC, 주축, 제어장치 등의 순으로 고장발생빈도가 높은 것으로 나타났다[7].

이러한 고장발생빈도 서브시스템에서 발생하는 고장모드는 NPRD95 및 FMD97을 바탕으로 한 고장모드 해석결과와 매우 유사한 현상을 나타내고 있는 것을 파악할 수 있었으며, 따라서 본 논문에서는 고장발생 빈도가 높은 Magazine & ATC와 PC-NC의 인터페이스 카드를 신뢰성 분석 대상으로 정하였다.

유니트별 고장빈도



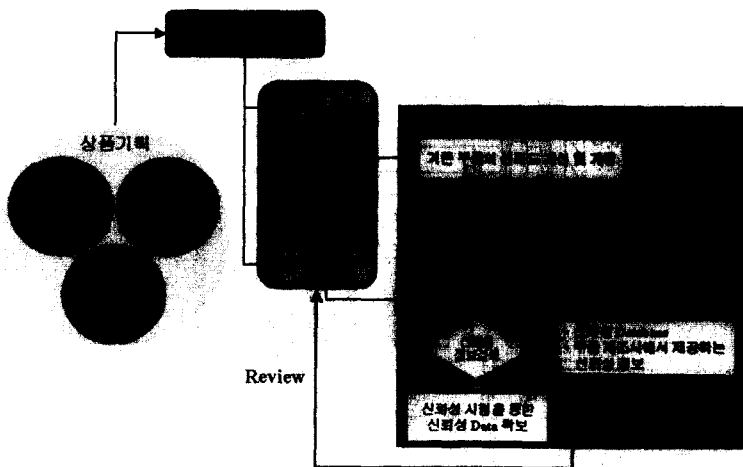
<그림 3> 머시닝센터의 유니트별 고장발생 빈도

### 3. 기계류품의 신뢰성 평가 패러다임 및 예측 절차

신뢰성 예측의 목적은 설계한 시스템에 신뢰성을 부여함에 있어 제품의 개발 단계에 따라 설계된 시스템의 신뢰성을 확인하고 문제점을 실제 생산에 앞서 파악하여 시장에서의 제품 경쟁력 향상과 돌발 사고에 따른 손해를 미연에 방지하는 것이다[9]. 이러한 목적 달성을 위해서는 지금까지 축적되어 있는 신뢰성 정보(A/S 자료, 시험자료, 성능평가 자료 등)를 활용하고 부품의 고장데이터(고장률 정보)를 종합하여 시스템의 신뢰성 예측이 필요하다[2]. <그림 4>는 일반적인 기계류 부품에 대한 신뢰성 예측 방안을 나타낸 것이다.

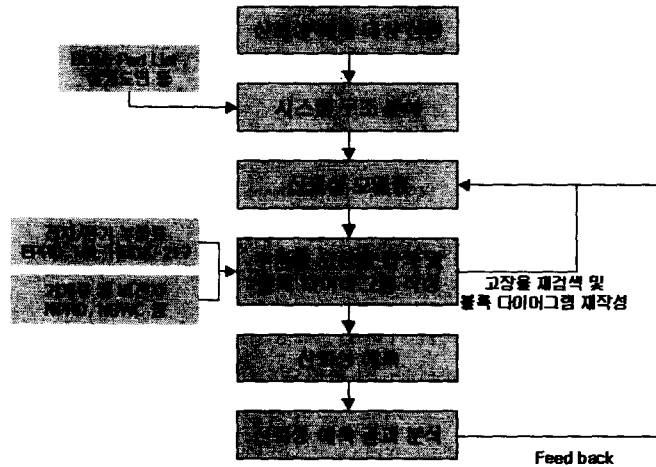
신제품은 개발, 생산, A/S 상에서 발생된 문제점을 고려하여 기존부품과 새로운 부품을 결합하여 설계한다. 기존 부품에 대한 신뢰도 개선 및 개량작업과 함께 신뢰성 DB를 통한 신뢰성 부품과 부품제조사에서 제공하는 신뢰성 정보를 참조하여 새 부품에 대한 신뢰성 확보가 필요하며, 설계된 제품 및 부품에 대한 신뢰성은 기존 부품과 새 부품의 신뢰도에 의해 좌우된다. 설계된 시스템의 신뢰성 예측을 위해서 본 연구에서는 <그림 5>와 같이 신뢰성 예측 업무 흐름을 정의 하였다[5].

예측을 위한 첫 번째 단계로, 예측하고자 하는 시스템을 선정하여 크기(규모)에 따른 예측 방법, 모델링, 과거 신뢰성정보 등의 기초 자료를 수집한다. 예측 대상이 선정되면 부품도(part list), 부품구성도(BOM, Bill of Materials), 설계도면 등을 바탕으로 시스템의 구조 분석이 이루어지는데, 단순한 구성부품의 구조뿐만 아니라 블록다이어그램 작성의 선행 작업으로 각 부품의 기능적 측면에서의 분석도 필요하다. 특히, 기계시스템은 동일한 부품 및 서브시스템이라도 적용되는 품질기준, 사용 환경에 따른 고장률이 다르기 때문에 구조 분석단계에서 이의 조사가 필요하다.



<그림 4> 기계류 부품의 신뢰성 예측 방안

모델링 단계에서는 주로 우발적인 고장에 대한 고장률(시스템이 최고의 상태로 운용될 때의 일정 고장률) 예측, 열화 고장(구성부품의 기능저하에 따른 시스템 전체의 특성 변화)에 의한 예측 등의 적용모델을 고려한다[2]. 기계시스템의 경우 이 두 가지 예측이 다 적용 가능하지만 본 연구에서는 부품의 고장률 적용상의 한계 때문에 우발적 고장에 대한 예측을 중심으로 신뢰도를 예측하였다.



<그림 5> 신뢰성 예측을 위한 절차

신뢰성 모델링이 완료되면 신뢰도 예측을 위한 기초데이터를 입력하며, 대부분의 기계시스템은 전자와 기계 부품이 혼합된 구조로서 앞 단계에서의 구조분석을 통해 산출된 시스템 트리에 각 부품의 고장률 데이터를 검색하여 입력한다. 고장률 데이터는 기계류 및 비전자 부품류에 대한 데이터베이스와 전기/전자 부품류에 대한 데이터베이스로 구분할 수 있다.

기계류 및 비전자 부품류에 대한 대표적인 고장률 데이터베이스로 NPRD95와 NSWC-98/LE1 등이 있다. 기계시스템의 신뢰성 예측에 이를 적용한 이유는 기계 부품의 경우 광범위한 고장률 분산 분포와 사용 환경, 다양한 스트레스에 대한 고장률 변화가 있어, 기계류 부품에 대한 신뢰성 정보의 획득에 어려움이 많기 때문에 신뢰성 분석 도구에서 제공하는 신뢰성 데이터베이스를 사용하였다[8]. NPRD95의 특징은 각 부품군의 약 20년간의 산업평균 고장률들을 반영하고 있으며, 다양한 출처들로부터 유사한 부분/부품조합의 고장률을 추출하여 간략한 고장률로 결합한 것이 특징으로 <그림 6>에 형식과 항목(부분)의 구조를 나타내었다.

EPRD는 RAC(Reliability Analysis Center)에서 발간한 전기/전자 부품의 고장률 데이터를 수집한 핸드북으로서 각 부품별 신뢰도 예측 데이터는 MIL-HDBK-217N2와 같은 예측 방법을 포함하고 있어 이와 함께 다른 예측기법을 보완하기 위해 활용할 수 있다. 제공하는 부품의 종류에는 capacitor, diode, integrated circuits, transformers, transistors 등 다양한 전자 부품 고장데이터를 제공하고 있으며[9], 전자류 부품의 경우 같은 부품/서브부품이라도 운용환경과 응용 파라미터(열가치수, byte 수, gate 수, 품질레벨 등)에 따라 고장률이 달리 산출된다.

Item No.	Part Name	Material	Notes	Price	Quantity	Total	
1	Aluminum	RF	Unknown	GB - Ground Bump	2702.000	0.00	
2	Accelerometer	(Summary)			2620.000	0.00	
3	Accelerometer	General			3000.000	0.00	
4	Accelerometer	General	Commercial	AI - Airframe Inhibited	6000.000	0.00	
5	Accelerometer	General	Commercial	AI - Airframe Inhibited	NPRD-082	53149.000	0.00
6	Accelerometer	General	Commercial	AI - Airframe Inhibited	NPRD-086	1400.000	0.00
7	Accelerometer	General	MI Spec	AI - Airframe Inhibited		4240.000	0.00
8	Accelerometer	General	MI Spec	AI - Airframe Inhibited		1693.000	0.00
9	Accelerometer	General	MI Spec	AI - Airframe Inhibited	1693.000	11111.000	0.00
10	Accelerometer	General	MI Spec	AI - Airframe Inhibited	2519.000	2600.000	0.00
11	Accelerometer	General	MI Spec	AI - Airframe Inhibited	NPRD-105	152.000	0.00
12	Accelerometer	General	MI Spec	DOR - Element		430.000	0.00
13	Accelerometer	General	MI Spec	DOR - Element	1123.000	240.000	0.00
14	Accelerometer	General	MI Spec	DOR - Element	1323.000	430.000	0.00
15	Accelerometer	General	MI Spec	GM - Ground Mobile		4040.000	0.00
16	Accelerometer	General	MI Spec	GM - Ground Mobile	2519.000	2770.000	0.00
256	Actuator	Hydraulic Linear	Commercial	AUC	2519.000	400.000	0.00
257	Actuator	Hydraulic Linear	Commercial	AUC	NPRD-085	6000.000	0.00
258	Actuator	Hydraulic Linear	Commercial	AUC	NPRD-086	6000.000	0.00
259	Actuator	Hydraulic Linear	Commercial	AUC	NPRD-088	2817.000	0.00
260	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	AUC		5820.000	0.00
261	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	ARW - Airframe Rotary Winged	NPRD-070	37620.000	0.00
262	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	AUF - Airframe Inhibited		240.000	0.00
263	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	AUF - Airframe Inhibited	1693.000	4813.000	0.00
264	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	AUF - Airframe Inhibited	NPRD-051	1200.000	0.00
265	Actuator	Hydraulic Linear	MI Spec	GF - Ground Fuel	2519.000	6952.000	0.00

<그림 6> NPRD 신뢰성 정보의 형식과 항목(부분)

구성된 시스템 트리와 구조분석에서 나타난 기능을 중심으로 블록 다이어그램을 작성하며, 블록과 블록을 연결시켜주는 연결선을 사용하여 작성한다. 각 블록은 물리적인 부품그룹 혹은 기능적인 개체와 일치하며 이들은 서로 독립적인 고장을 목적으로 선정되며, 블록들의 상호관계들(직렬구조 또는 병렬구조)을 나타내기 위해서 연결선들을 사용한다. 블록 다이어그램의 기본적인 구조는 각 부품의 관계를 분석하여 왼쪽에서 오른쪽으로 직렬로 연결된 블록(부품)들과 작동순서가 일치되어야 하지만, 모든 시스템(모든 부품을 포함하는)을 블록 다이어그램으로 표현하기는 어려우며, 경우에 따라서는 시스템의 기능 혹은 상태만을 중심으로 표현할 수 있다. 즉, 시스템에 부여되는 물질흐름(material flow), 구조적 힘의 흐름(structural force flow), 에너지 흐름(energy flow) 및 정보 흐름(information flow) 등과 같은 시스템 내의 관련 부품들의 기능들을 표현하여 각 부품들의 고장률에 따른 시스템의 기능적 신뢰도를 평가하고 예측할 수 있다[7]. 시스템의 신뢰도는 모든 가능한 경우(작동, 고장 등)를 나열하여 신뢰도를 계산하는 사상 공간법, 시스템이 작동하는 모든 경로를 찾아 계산하는 경로 추적법, 조건부 확률공식을 이용하는 분해법, 시스템이 고장 나기 위한 최소한의 요소 집합으로 분해하는 최소 절단 집합법과 시스템이 작동하기 위한 최소 크기의 집합으로 구분하는 최소 패스집합법 등이 있다[3]. 본 연구에서는 블록 다이어그램의 작성에 시스템이 작동하는 경로에 있는 부품들로 표현하는 경로 추적법을 사용하였다.

이러한 과정을 통해 입력되어 계산된 신뢰도는 MTBF, 고장률, 신뢰도(확률)로 계산되어 지는데 앞에서 구성한 시스템의 구조 혹은 서브-시스템의 구성별로 MTBF와 고장률 등이 계산되어 전체시스템의 신뢰도가 계산된다.

예측결과의 평가는 가정사항과 시스템의 구체적인 제약조건들, 환경조건, 작동시간대의 임무, 장치를 정의(신뢰성 모델링 및 블록 다이어그램 작성)하는데 있어 신뢰도 목표 대 예측을 비교/고려하여 설계자와 분석자가 협의하고 판단하여야 한다. 판단과정에서의 문제점은 신뢰성 모델링을 재모델링 하거나 부품별 고장률 정보와 블록 다이어그램을 다시 작성하여 계산결과를 검토하여야 한다.

이와 같은 신뢰성 예측절차를 통하여 설계시 신뢰성 지표의 산출과 과학적인 방법으로 사



용 환경에 따른 고장률의 예측 및 평가가 가능하게 된다. 이와 함께 각 부품별 고장 데이터를 체계적으로 확보하여 제품의 전주기에 걸친 가용도를 향상, 고장상위부품에 대한 보전대책을 수립 할 수 있다.

## 4. 신뢰도 예측 적용연구 및 설계심사

신뢰도 예측 적용은 앞 장에서 설명한 절차에 따라 공작기계의 핵심부품 중에서 기계류 부품의 경우 고장률 데이터베이스인 NPRD95를 사용하여 Magazine & ATC의 신뢰도를 예측하고 전자류 부품의 경우 MIL-HDBK-217FN2를 사용하여 PC-NC 인터페이스 카드의 신뢰도를 예측/분석 하였다.

### 4.1 Magazine & ATC(Automatic Tool Changer)

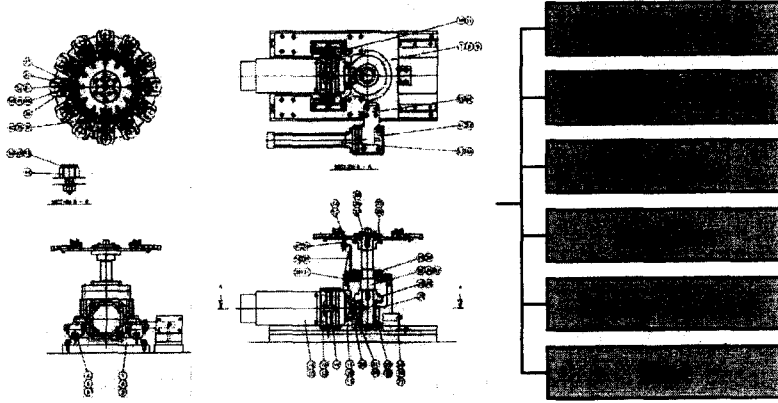
#### 4.1.1 신뢰성 예측 대상 선정 및 시스템의 구조분석

Magazine & ATC의 주요 고장 발생항목으로는 공구교환 불량 및 불가, 실린더 작동 불가, Magazine 작동 불가, 공구호출 불가, 볼트 풀림으로 인한 유격발생 및 작동불량 등이 있다. 따라서 전체 시스템 중 고장이 가장 많은 Magazine & ATC를 대상으로 신뢰성 예측을 하고 예측결과를 분석하기로 하였다.

공작기계의 핵심부품 중 하나인 Magazine & ATC는 머시닝센터에 공구를 공급하는 장치로서 공작물을 가공하는 동안 빈번한 공구교환과 함께 고속화를 위해 빠르게 운동하는 특징이 있다. 구성은 공구가 직접 장착되어 보관되는 Magazine과 장착된 공구와 Magazine을 회전 운동시켜 교환도구(arm)를 이용하여 머시닝센터의 주축에 공구를 교환하는 ATC가 있다. Magazine & ATC는 6개의 sub part로 구성되어 있으며 <그림 7>과 같은 구성으로 되어 있다.

구성의 주요 특징으로, 공구 인식부(tool reference)는 Magazine에 있는 공구의 위치를 인식하는 기능을 하며 주요 부품으로 비접촉으로 공구의 유무를 판단하는 근접스위치(Proximity Switch)가 있다. Magazine sliding부는 Magazine 및 Rotation부를 받치고 있는 일종의 플레이트로서 ATC 전체의 하중을 지지하고, Magazine은 공구교환 장치에 의해 공구가 탈/부착되는 곳으로 pull stud bolt의 삽입에 의해 장착되는 형식이 아닌 Gripper에 의해 공구 Holder를 고정한다. Gripper의 안쪽에는 고무재질의 패킹이 있으며, 주요부품으로는 Gripper와 Gripper의 장력을 발생시키는 스프링 등이 있다. 회전부(Rotation)는 서보모터의 회전 동력을 베벨기어(40Z & 20Z)를 이용해 Magazine을 회전시키는 기능을 하며, 직선 구동부(Linear Motion)는 Magazine Sliding부를 Air cylinder를 이용해 공구를 교환하는 위치까지 움직이게 하는 기능을 한다. Base부는 ATC의 직선운동시 안내면 역할 기능을 하며 LM Guide 등이 주요 부

품이다.



<그림 7> Magazine & ATC의 구성

#### 4.1.2 부품별 고장률 검색 및 블록 다이어그램 구성

앞에서 언급한 신뢰도 예측 절차대로 분석된 자료를 바탕으로 각 부품별 고장률을 검색하고 블록다이어그램을 구성하였다. 각 부품들에 대한 고장률 검색은 분석도구가 포함하고 있는 기계류 부품 신뢰성 데이터베이스 NPRD95를 사용하였다. 시스템 트리의 구성은 최상위 시스템을 0 레벨, 시스템을 구성하는 6개의 서브시스템을 1레벨, 서브시스템을 구성하는 부품들을 2레벨로 구분하여 시스템 트리를 구성하였다. <그림 8>은 Magazine & ATC의 시스템 트리 구성과 Tool 수동교환부의 고장률 탐색 및 구성을 나타낸 것이다.

System	Top-level ass...	Part Number	Description	Sub Type	Value
ATC Assy	98.942200				
ToolPart	13.554900				
Magazine	6.470700				
	38.427800				
		C30091214	Other	MPRO95 Part	1.00
		C30091224	Other	MPRO95 Part	1.00
		C30091234	Other	MPRO95 Part	2.00
		R15149	Other	MPRO95 Part	2.00
		C30091124	Other	MPRO95 Part	2.00
		R42334	Other	MPRO95 Part	1.00
		S2208461	Other	MPRO95 Part	4.00
		S2206461	Other	MPRO95 Part	4.00
		S0011881	Other	MPRO95 Part	2.00
		S4000831	Other	MPRO95 Part	2.00
		S2209061	Other	MPRO95 Part	4.00
		S5100801	Other	MPRO95 Part	4.00
		S3462621	Other	MPRO95 Part	20.00
		S4000931	Other	MPRO95 Part	1.00

<그림 8> Magazine & ATC의 시스템 트리 구성

NPRD95 신뢰성 데이터베이스의 고장률 정보 검색은 해당되는 Part의 유형과 이 유형에 포함되는 Part의 Sub Type을 선정하면 여기에 맞는 고장률 리스트가 출력된다. 출력된 고장률 리스트에서 품질기준, 환경, 재질 등을 고려하여 설계자가 사용한 적절한 고장률을 선

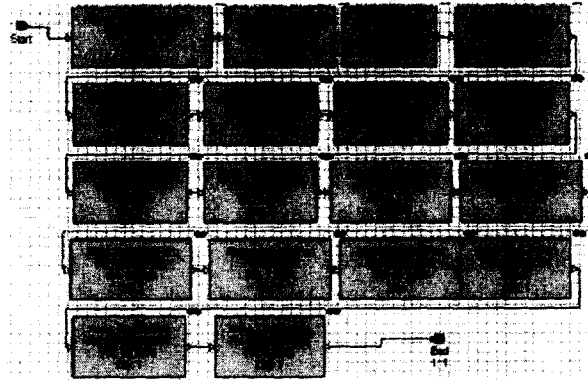
택하게 된다. 본 연구에서는 출력된 고장률 후보가 다수인 경우 품질기준과 사용 환경을 바탕으로 적정 고장률을 선택하였다. 품질기준은 대부분이 상용(commercial) 혹은 Unknown을 기준으로 하고 환경은 대부분 GF-Ground Fixed를 사용하였으나 설계자가 취약부품이라고 생각되는 부품은 GM-Ground Mobile 환경을 선택하였다. <그림9>는 NPRD95 신뢰성 데이터베이스를 바탕으로 Rotation부 Gear Shaft의 고장률을 선택하는 예를 나타낸 것으로 Part Type에 Shaft와 Shaft 중에서 일반적인 기능을 하는 것을 Sub Part Type으로 선택하면 하단에 품질기준, 환경기준 등을 기준으로 다수의 고장률 리스트가 출력된다[4]. 기계류 부품의 경우 전자류 부품의 경우와 비교해 신뢰성 정보가 부족하고 분류가 한정되어 있기 때문에 정확히 일치되는 부품이 없으면 가장 유사한 부품의 고장률을 사용하는 유사부품 비교법을 사용하여 고장률을 선택하였다[7][8].

Part Type	Description	Part Number	Failure Rate
---	---	----	7.6673
Mil-Spec	GM - Ground Mobile	18283-000	502.7652
Unknown	GM - Ground Mobile		7.6713
Unknown	ARW - Airborne Rotary Winged	18459-000	291.4531
Unknown	ALUT - Airborne Uninhabited Tran	18459-000	4.8094
Unknown	GB - Ground Benign	27027-000	0.35
Unknown			
Unknown	GM - Ground Mobile	18459-000	12.4005
Unknown	NU - Naval Unsheltered	18459-000	6.2566

<그림 9> 신뢰성 정보의 검색  
(Rotation부의 Gear Shaft)

이렇게 입력된 각 부품들의 고장률 정보는 앞서 시스템 트리를 구성할 때 입력한 구성수량과 곱하여져 <그림 8>에 나타나 있는 공구수동교환부의 시스템 트리에서와 같이 시스템 내에서 각 부품의 고장률이 계산된다. 시스템 트리와 신뢰성 정보검색에서 유의하여야 할 점은 실제 구성부품의 작용여부를 분석하여야 한다는 점이다. 예를 들어 조립품의 경우 단위 고장률과 구성 개수의 곱이 전체의 고장률이 되기 때문에 메커니즘상 실제 작동되는 수를 입력한다. 메거진의 경우 공구가 장착되는 pot가 12본이지만 실제 ATC의 기능상 작동하는 pot는 1개이기 때문에 부품구성표상에 있는 수량을 1개에 해당하는 수량만을 입력한다. 이렇게 작성된 시스템 트리는 신뢰성 블록다이어그램의 작성에도 영향을 미친다.

신뢰성 블록다이어그램은 시스템이 나타내는 에너지, 물질, 정보 등의 흐름을 기능중심으로 표현하여 각 부품들의 고장률에 따른 신뢰도를 예측할 수 있는 기법으로 본 연구에서는 Magazine & ATC의 공구교환을 위한 동력전달 흐름을 중심으로 신뢰성 블록다이어그램을 작성하였다. 구성된 블록다이어그램은 시스템의 동력 전달과정이 Sequence하게 전달되기 때문에 동력전달과정에 있는 구성부품이 직렬로 연결된 구조로, <그림 10>에 Magazine & ATC의 블록다이어그램을 나타내었다.



<그림 10> Magazine & ATC의 신뢰성 블록다이어그램(동력전달 중심)

4.1.3 신뢰성 예측결과 산출 및 분석

Magazine & ATC의 신뢰성은 고장률(Failure Rate) 95.4 Failures/백만시간, 평균고장간격 시간(MTBF) 10,489시간, 신뢰도(Reliability) 0.9905로 예측되었으며, 이는 시스템이 안정화 되었을 때의 상태 즉, MTBF 시간에서의 신뢰도를 나타낸다. 이와 같은 결과는 머시닝센터 시스템 레벨의 목표 MTBF가 약 5,000~6,000시간 정도이므로 서브-시스템인 Magazine & ATC의 신뢰성 예측치는 양호한 것으로 판단된다. <표 2>는 6개 서브시스템의 MTBF를 나타낸 것으로 Magazine부와 Rotation부의 MTBF가 가장 짧은 것으로 계산되었으며, MTBF는 고장률과 반비례하므로 실제 운전 중에 두 서브 구성품의 고장발생확률이 높다는 것을 의미한다.

실제로 신뢰성 데이터베이스에 의해 예측된 신뢰성과 목표 신뢰성과의 차이가 발생할 수 있는데, 이는 기계류 부품에 대한 신뢰성 데이터베이스의 특성상 정확히 일치되는 부품이 없을 경우 유사부품비교법에 의한 고장률 검색 때문인 것으로 사료된다.

<표 2> Magazine & ATC 서브시스템의 MTBF

서브-시스템	MTBF
Tool Reference	73,700
Magazine Sliding	1,490,535
Magazine	25,888
Rotation	26,324
Linear Motion	424,538
Base	469,219

<표 3> Magazine & ATC 서브시스템 및 주요부품의 고장률

서브-시스템	고장률	구성품	고장률	비고
공구인식부	13.5685			
Magazine Sliding 부	0.6709	Screw, SET	0.3496	1pot 구성 수량
		PIN, GRIPPER	9.0910	
		BUSH, DU	2.2174	
		WASHER, SPRING	2.4416	
				Magazine 회전구동 동력전달
직선 구동부 (Linear Motion)	2.3555	VALVE, AIR SOL	1.6650	
Base부	2.1312	GUIDE, LM	0.0160	

Magazine & ATC 서브시스템의 각 고장률과 주요 부품 중 고장률이 높은 부품을 <표 3>과 같이 분류하였다. 표에서 보는 바와 같이 대부분의 고장은 Magazine부와 Rotation부에서 발생할 것으로 예상되며, 특히 Magazine부의 경우 블록다이어그램의 작성에서 설명한 바와 같이 공구가 장착되는 12pot 중 1pot의 수량만을 구성하였는데도 예측된 고장발생 확률은 높게 나타났다. 또한 Rotation부의 경우 Shaft와 Bevel 기어 쌍, 축회전의 베어링 등의 부품이 고장률이 높게 분석되었으므로 이 부품에 대한 고장률 정보 재검색 혹은 블록다이어그램의 재구성을 통해 재분석 필요가 있다. 목표신뢰성의 달성 및 향상을 위하여 필요할 경우 설계자와의 협의를 통해 DR(Design Review) 및 설계 변경 작업도 가능하다. 특히 공구인식부의 경우 서브시스템의 전체 고장률 13.56 중 근접 스위치의 고장률이 13.15나 되므로 사용 센서에 대한 신뢰성 분석과 대체 부품에 대한 기술적 검토가 필요할 것으로 나타났다.

## 4.2 PC-NC 시스템의 인터페이스 카드

### 4.2.1 시스템의 특징

PC-NC는 사용자와 실제 공작기계를 연결 시켜주는 중요한 역할을 하고 있으며, 크게 공작기계의 운영/기능수행 및 사용자 인터페이스를 담당하는 소프트웨어부와 개발된 운영시스템이 운영되는 하드웨어부로 구분할 수 있다. 특히, PC-NC의 하드웨어는 일반 PC의 구조와 매우 유사하기 때문에 기계류 부품에 비해 보다 많은 신뢰성 정보를 가지고 있는 전기/전자품의 신뢰성 정보를 이용할 수 있고 고장률 산출이 정형화 되어 있어 보다 정확한 신뢰

성 평가가 가능하다는 장점이 있다.

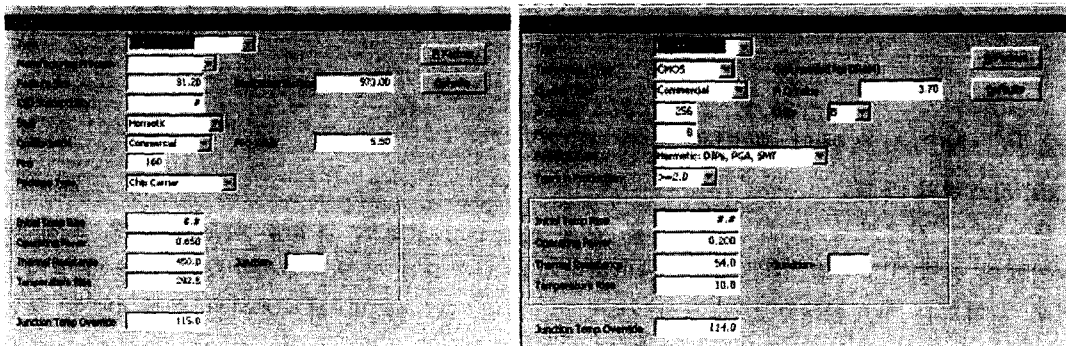
PC-NC의 구조는 사용자와의 인터페이스를 담당하는 LCD/Key부와 공작기계의 하위 구성품을 제어하는 CNC Unit, Drive System, PLC Related I/O 등으로 구성되어 있다. 이 중에서 가장 핵심이 되는 CNC Unit의 Motion & I/O 카드(이하 인터페이스 카드)는 공작기계의 각종 제어기들과 광통신을 이용하여 CAN으로 연결되어 운영되는 핵심 제어부이다. 따라서 인터페이스 카드의 고장률이 PC-NC 전체 시스템의 고장률 및 신뢰도와 밀접한 관계가 있으므로 PC-NC 인터페이스 카드를 신뢰성 분석 대상으로 선정하였다.

#### 4.2.2 부품별 고장률 자료의 검색

인터페이스 카드의 부품 구성은 IC류 15종, Semiconductor류 5종, Connector류 7종, Resist류 15종, Capacitor류 7종 및 PCB 기판, Slot mounting B/D 등과 같은 기타 7종 등 총 54종으로 구성되어 있다. 부품별 고장률은 기계류 부품과 비슷하게 구성 부품이 해당하는 Category와 Sub category에 의해 검색되지만, 기계류 부품의 경우 사용 환경에 따른 적합한 고장률을 선택하는 것에 비해 전자류품의 경우 Sub category에 따라 요구 입력이 틀려진다.

인터페이스 카드의 회로도 와 Part List를 바탕으로 신뢰성평가 도구에 내장되어 있는 신뢰성 데이터베이스(MIL-HDBK-217-FN2)를 이용하여 부품별 고장률 계산을 하였다. <그림 11>은 같은 IC류에서 Sub category가 VHSIC/VLSI COMS와 Memory의 입력사항을 나타낸 것으로 전자의 경우 제품의 크기, 면적, Pin 수 등을 요구하는 반면에 후자는 Bits 수, Package type 등의 정보를 요구한다.

또한 전자류 부품은 온도에 대한 신뢰도가 민감하므로 초기온도, 구동전력, 열저항, 온도 상승치 등과 같은 온도에 대한 정보를 요구한다. 이러한 정보들은 각 부품별로 특성치를 조사하여 입력하여야 하며 입력의 정도가 높을수록 보다 정확한 고장률이 계산되어 진다. 예를 들어 각 부품들에게 허용되는 한계치 이상의 최대값을 나타내는 Pi Q value의 경우 품 질레벨을 지정하여 자동으로 시스템에서 제공하는 값을 사용할 수도 있으나 부품제조사 혹은 실험실에서 얻어진 값을 입력하면 보다 정확한 결과를 기대할 수 있다.



<그림 11> 전자류 부품의 고장률 산출을 위한 입력

입력된 정보를 바탕으로 각 부품들에 대한 고장률 산출식이 있어 이에 따른 알고리즘이 존재하며, 특별한 경우 특별공식에 의해 산출될 수도 있다. 메모리의 경우 MOS, Bipolar로 구분되고, MOS는 다시 형태에 따라 ROM, PROM/UVEPROM/ EEPROM/EAPROM, DRAM, SRAM으로, Bipolar는 ROM/PROM, SRAM으로 구분되는데 이의 고장률 산출식은 다음과 같다[6][9].

$$\lambda_p = (C_1\pi_T + C_2\pi_E + \lambda_{CVC})\pi_Q\pi_L$$

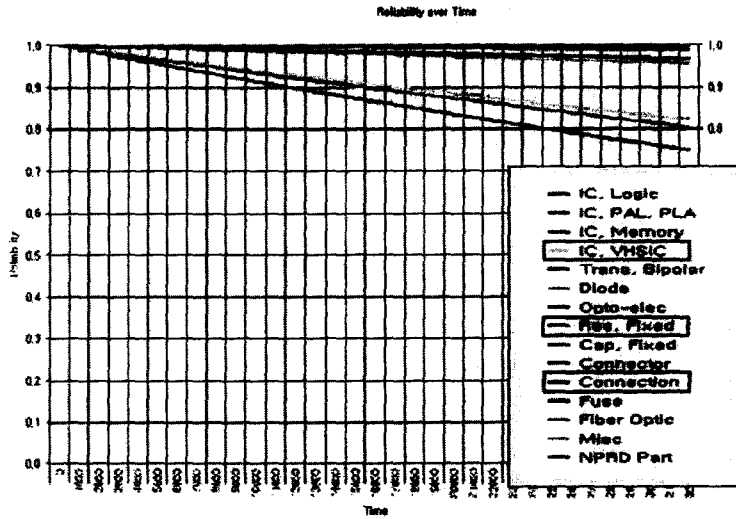
- 복잡도 Factor  $C_1$  = 메모리의 용량인 Bits수를 이용하여 메모리 종류별 값 산출
- 온도 Factor  $\pi_T$  = 생산기술에 따른 온도 영향 팩터
- Package Factor  $C_2$  = Packaging 영향에 따른 열적인 영향과 전자적인 기생성분
- 환경 Factor  $\pi_E$  = 사용 환경조건에 따른 영향
- 품질 Factor  $\pi_Q$  = 등급분류에 따른 품질요소
- 부품숙성도(Leaming) Factor  $\pi_L$  = 부품의 생산 연한(안정화 년수)요소

이와 같이 입력된 요소들을 이용하여 각 부품에 대한 고장률을 산출할 수가 있으나 설계에서 사용된 부품들의 정확한 사양이 없는 경우가 있기 때문에 정확한 예측을 위해서는 앞에서 언급한 Factor에 대한 요소 분석과 필요할 경우 별도의 환경실험이 필요할 수도 있다.

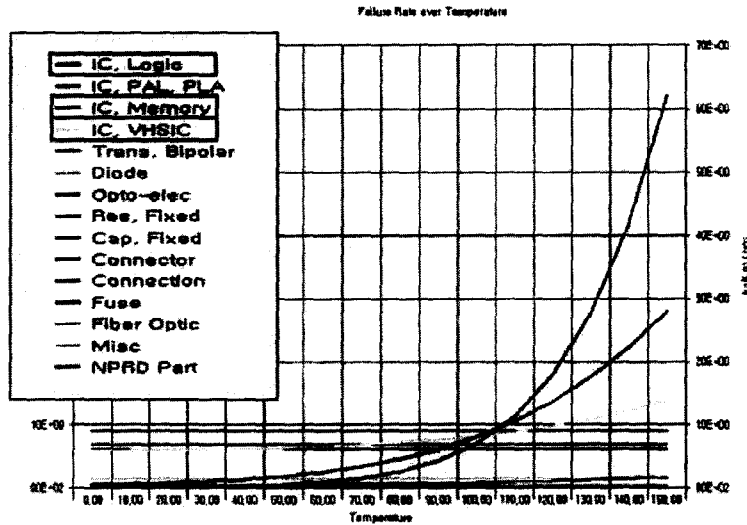
#### 4.2.3 예측결과와 분석

예측결과는 고장률(Failure Rate): 31.43 Failures/백만시간, MTBF 31,814시간, 신뢰도 0.9968로 산출되었으며, 약 3.6년의 평균고장수명으로 양호한 것으로 분석되었다. 신뢰도는 MTBF 31,814시간에의 신뢰도를 의미한다. 사용한 부품의 기존 고장률과 주위 환경, 사용조건 등의 스트레스를 고려한 Mission MTBF는 3,762시간으로 약 8배의 차이가 나는 것으로 나타났다. Mission의 조건은 사용자가 별도로 정의할 수 있는데, 여기에서는 온도의 변화를 주기로 변화하는 환경을 가정하였다.

인터페이스 카드의 경우 시스템 구성이 2레벨로 구성되어 카드와 부품으로 구성되어 있으며, <그림 12>는 시간변화에 따른 사용부품군의 신뢰도 변화를 나타낸 것으로 저항(Res, Fixed)과 IC의 VHSIC 및 Connection 제품군의 신뢰도 저하가 다른 부품군에 비해 빨리 발생되는 편으로 나타났다.



<그림 12> 시간변화에 따른 사용부품군의 신뢰도 변화



<그림 13> 온도변화에 따른 부품군의 고장률 변화

전자류 부품의 경우 온도에 대한 신뢰도가 민감하여 열 발생에 대한 부품군과의 고장률 상관관계를 분석하였으며 그 결과가 <그림 13>에 나타내었다. 그림에서 보는 것 같이 최고 상승온도를 150°C로 설정하고 온도를 증가 시켰을 때 각 부품군들의 고장률은 70°C에서부터 증가하기 시작해서 100°C를 넘어서면 IC군의 Logic, Memory, VHSIC 부품들의 고장률이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. 즉 세 부품군들이 열에 취약한 부품임을 알 수 있고 이에 대한 기술적인 설계검토가 필요한 것으로 분석된다. 이와 함께 IC의 VHSIC/VLSI 제품군에 대한 고장률과 열가 인자와의 관계를 <표 4>와 같이 분석하였는데 온도 상승률



(Temperature Rise)과 많은 관계가 있는 것으로 나타났다.

<표 4> IC류 VHSIC/VLSI의 고장률과 열가 인자의 관계

종류	Operating Power	Thermal Resistance	Temperature Rise	Junction Temp
IC, VHSIC/VLSI(1)	0.650	450	292.5	115
IC, VHSIC/VLSI(2)	0.470	250	117.5	111
IC, VHSIC/VLSI(3)	0.300	48	14.4	116

전자류 부품의 신뢰성 예측에서 많은 시간이 소요된 부분은 각 부품의 온도와 관련된 인자를 구하는 것으로 기계류 부품과 다르게 같은 Category, Sub category에 포함되더라도 입력되는 요소들에 의해 고장률이 틀려지므로 정확한 입력정보와 이를 구하기 위한 많은 노력이 필요할 것이다.

## 5. 결론

신뢰도란 장기간의 관점에서 측정, 평가되어야 하는 장기간의 품질(Long-Term Quality)로서 지금까지 활용되었던 성능이라는 단기간의 품질(Short-Term Quality)과는 다른 기술적 접근을 요구한다. 이와 같은 변화에 대응하기 위해서, 설계단계에서부터의 신뢰성 제고를 위해 고장률 데이터베이스를 이용한 신뢰성 예측기법을 적용하였다. 본 연구에서는 머시닝 센터의 고장모드를 조사·분석하고, 이를 바탕으로 공작기계의 핵심부품이면서 고장발생빈도가 높은 Magazine & ATC와 PC-NC의 인터페이스 카드에 대해 신뢰성 평가·분석 적용연구를 해 보았다. 예측된 부품들의 고장률은 기계류 부품의 고장률 데이터베이스인 NPRD95와 전자류 부품의 고장률 계산 Document MIL-HDBK-217F N2를 사용하여 신뢰성 척도인 고장률, MTBF, 신뢰도를 산출하였으며, 이들 결과는 목표 신뢰성을 설정하는 기반자료 및 취약부의 예상할 수 있는 기반자료로 활용하고 있다.

이러한 적용과정을 통해 기계류 부품에 대한 신뢰성 정보가 매우 부족하다는 것을 알 수 있었으며, 실 적용과정에 부족한 신뢰성 정보의 획득을 위해 신뢰성 시험기의 개발 및 실험자료의 축적이 필요할 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 윤상운(1996), 신뢰성 분석, 자유아카데미
- [2] 이치우, 이성우(1996), 응용신뢰성공학, 구민사
- [3] 김원경(1999), 시스템 신뢰도 공학, 교우사
- [4] 이수훈, 송준엽, 박화영 외(2001), 머시닝센터의 고장모드해석에 관한 연구, 한국정밀공학 회지, 18권 6호, 74~79
- [5] 이승우, 송준엽, 박화영 외(2001), 공작기계 핵심 Unit의 신뢰성 평가기법 및 활용에 관 한 연구, 한국정밀공학회 추계학술대회, 43~46
- [6] (주)모아소프트 신뢰성기술연구소(2002), 신뢰성 예측가이드, 교우사
- [7] 한국기계연구원(2002), 고속·지능형 시스템의 신뢰성 평가기술 개발, 산업자원부
- [8] Reliability Analysis Center(1995), Nonelectric Parts Reliability Data Document
- [9] Department of Defense(1995), MIL-HDBK-217FN2 Document
- [10] Reliability Analysis Center(1997), Failure Mode/Mechanical Distribution Document
- [11] H. Paul Barringer, David P. Weber(1995), Where is my data for making reliability improvements, 4th International Conference on Process Plant Reliability
- [12] H. E. Blanton, R. M. Jacobs(1961), A Survey of Technique for Analysis and Prediction of Equipment Reliability, Trans. IRE RQC, 18