

# 기계류 부품 신뢰성 모델링에 관한 연구

하성도\* · 이두영\*

## A Study on the Development of Reliability Modeling in Machine Parts

Sungdo Ha\*, Dooyoung Lee\*

### Abstract

This work aims to develop modeling methodology of machine part reliability. The reliability model is to be used for predicting and improving reliability in planning and design processes of products. In order to develop the reliability model of machine parts, the functions and interactions of sub-units of machine parts are analyzed first and function network is constructed. Using the function network, function block diagram is developed, which can be the basis for deriving reliability block diagram. Modeling of machine part reliability has not been widely studied since the reliability modeling of machine parts requires understanding of the functions and failures of their components in several viewpoints. This work tries to find general methodology of reliability modeling and proposes a framework for reliability improvement during machine part development.

### 1. 서론

기술혁신이 급속한 현대일수록 제품에 대한 소비자로부터의 신뢰성의 요구는 높아져 가고 있으며, 이러한 고도의 신뢰성을 구현하기 위하여는 신제품의 설계 및 개발단계에서부터 시스템에 포함되는 부품, 기능, 작업환경 및 그들의 상호관계의 지식을 바탕으로 시스템의 신뢰성을 고려하는 기술을 개발하여 이에 대한 대책을 수립해야 한다.

신뢰성은 부품, 장치, 장비, 혹은 시스템이 주어진 조건 하에서 운용될 때 규정된 시간 동안 고장없이 지속적으로 그 기능을 수행할 확률로 표시되는 제품의 품질이다[1].

현재 기계류 부품의 품질은 제품의 제조 단계에서의 불량 발생 파악과 이의 방지 및 보완에 연구가 이루어져 왔으며, 제품의 설계 단계에서 이루어져야 하는 제품의 품질 및 신뢰성의 예측과 이들의 향상을 위한 신뢰성 모델링에 관한 연구는 미흡한 상황이다. 특히 전류의 흐름 상태에 따라 0과 1의 값으로 시스템의 신뢰성을 분석할 수 있는 전기, 전자 시스템과는 달리 기계, 전기, 전자 및 유체압력 등의 복합적인 상호작용에 의해 작동되는 기계류 부품에 대해서는 정형화된 모델링 기법이 제시되지 못하고 있다.

본 연구의 목적은 기계류 부품의 설계 및 개발단계에서 계획된 신뢰성이 확보되었는지를 확인하며 다른 계획방안이 있는지의 여부를 검사하고 나아가서는 신뢰성과 보전성을 높이기 위한 개선안의 도출에 도움을

\* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

출 수 있는 기계류 부품의 신뢰성 모델링 방안을 제시하는 데에 있다.

Fig. 1에서와 같이 제품에서의 신뢰성 특성 정보와 이에 대한 평가 및 분석활동을 통해 도출된 평가결과를 기반으로 보다 향상된 신뢰성 정보를 제공하기 위해 제품 설계 단계에서의 설계정보를 이용한 신뢰성 모델링을 통해 신뢰성 설계를 위한 기반기술 및 분석기술을 제공할 수 있을 것이다.

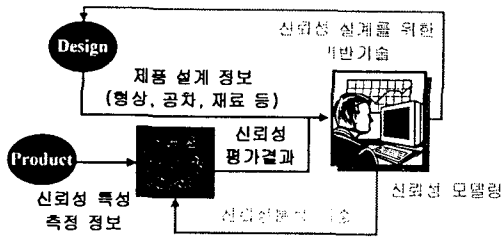


Fig. 1 기계류 부품 신뢰성 모델링 활용방안

## 2. 관련 연구의 고찰

제품 설계 단계에서 생성되는 신뢰성 개념을 수집하고 다시 피드백 시키기 위한 방법론을 제시한 연구로서 Takeshi Murayama의 연구가 있다[2]. 이 연구에서는 제품의 설계와 고장 나무 분석을 병행하여 CAD 시스템을 통해 신뢰성 관점에서 설계 정보를 반영하는 것으로 설계정보의 변경과 관련된 부품만을 고려하여 고장 나무 분석을 실시하는 내용이다. 하지만 고장 나무 분석을 하기 위해 요구되는 시스템의 모델링 방법론은 구체적으로 제시하지 않았다.

신뢰성과 연계시킬 수 있는 모델링 방법에 관한 내용으로는 Goal Tree-Success Tree (GTST)기법을 이용하여 복잡한 시스템의 모델링 방법을 제안한 Mohammed Modarres의 연구가 있다[3,4]. 이 연구에서는 시스템이 달성해야 할 목표를 미리 정의해 놓고 이를 위해 수행되어야 할 시스템 동작 세부단계를 기능으로 파악한 후 각 기능간에 주고받을 수 있는 실체들을 Mass, Energy, Momentum, Force, Charge,

Electromagnetic wave 및 Information으로 카테고리화 하였으며 기능과 실체들의 상호작용을 문법화 하여 시스템 기능의 Success Tree를 작성하였다.

### 2.1 고장 나무 분석

고장 나무 분석은 시스템의 바람직하지 않은 결함사상(Top Event)의 원인이 되는 실마리를 추적하기 위한 신뢰성 및 안전성 설계 분석 기법으로서[5], 1960년대 Bell System에서 시스템의 안전성을 목적으로 처음 사용되었다[6].

Fig. 2에서 보는 바와 같이 고장 나무 분석에서는 시스템의 최상위를 고장상태(Top Event)로 규정하고 최상위의 고장을 일으키는 차순위의 고장원인을 찾아내어 이들의 인과관계를 논리기호(AND 또는 OR)를 사용하여 나뭇가지 모양으로 결합시킨 후 차순위의 고장 원인에 대해서 더 이상 분해가 불가능한 최하위의 고장 원인인 기본사상이 될 때까지 분석을 반복한다[7].

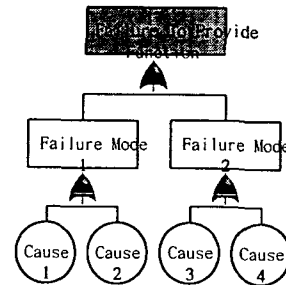


Fig. 2 Fault Tree Analysis Structure

사건, 혹은 보다 일반적으로 체계고장의 잠재원인을 결정하고, 고장확률을 추정하는 연역적 방법인 고장 나무 분석은 고장의 근본 원인을 추적하기 위하여 고장 자료가 나와 있는 수준에 이르기까지 시스템을 하위 체계(subsystem)로, 구성품(component)으로, 부품(part)으로 분해할 필요가 있는 상황에 특히 적절하며 다음과 같은 효과를 얻을 수 있다[8].

- (1) 시스템의 고장을 연역적으로 추적해 감으로써 고장의 형태를 체계적으로 알

- 수 있다.
- (2) 시스템의 고장을 도해적으로 나타냄으로써 시스템의 구조를 잘 이해할 수 있다
- (3) FTA기법을 전산화함으로써 신뢰성 분석에 필요한 많은 시간과 노력을 절약할 수 있다
- (4) 전체 시스템에 영향을 미치는 요인을 쉽게 찾을 수 있고 그에 대한 장치를 취함으로써 효과적으로 신뢰성을 향상시킬 수 있다.

## 2.2 신뢰성 블록 다이어그램

각 시스템의 구성품이 기능적 신뢰도에 어떻게 공헌하는가를 이해하기 위해 사용하는 신뢰성 블록 다이어그램(Reliability Block Diagram)은 신뢰도, 가용도 및 물류 영향 연구에 필요한 시스템 분석 도구로서 결합을 내포하는 시스템을 설계하는데 있어서 필수적이다. 신뢰도 목표의 확립, 시스템의 신뢰도와 물류의 요구조건 추정, 부품들의 신뢰도 할당 등에 적용될 수 있으며 시스템 구조의 유형에 따라 Fig. 3과 같이 크게 직렬구조와 병렬구조로 나누어 볼 수 있다.

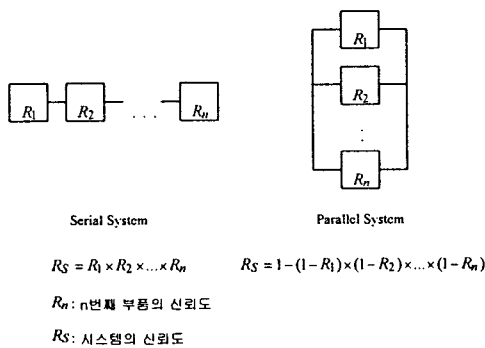


Fig. 3 Reliability Block Diagram 및 신뢰도 계산

## 3. 기계류 부품 신뢰성 모델링

신뢰성 모델링은 신뢰성 예측을 위하여 신뢰성 블록 다이어그램(Reliability Block Diagram)상에 나타나는 부품 상호간의 관계를 고려하는 구조분석 절차이다. 시스템의 구성 부품이 신뢰성 블록 다이어그램상에 단순한 직렬(Series) 또는 병렬(parallel)로

연결되어 있는 경우 모델링은 간단히 해결될 수 있다. 그러나 모든 시스템을 신뢰성 블록 다이어그램으로 표현하기는 힘들며 경우에 따라서는 그 시스템이 취할 수 있는 상태를 나타낸 상태 다이어그램(state diagram)으로 표현할 수 밖에 없는 경우도 있다.

특히 기계류 부품의 경우는 다음과 같은 이유로 기존의 신뢰성 모델링 방법으로는 일반화된 방법을 찾아내기가 어려운 상황이다.

① 복수의 기능 : 각 부품은 한가지 이상의 역할을 가지고 작동되는 경우가 많으며 이러한 경우 특정 기능수행과 관련된 고장을 데이터의 효율성은 떨어진다.

② 불일정한 고장을 : wear, fatigue등과 같이 스트레스와 관련된 고장 메커니즘은 결국 장비의 degradation을 가져오며 이러한 상황에서는 기계류 부품의 고장율이 일정하다고 가정하기 힘들며 이로 인해 데이터 수집 과정이 매우 복잡하다.

③ 스트레스의 반복과정 : 기계류 부품의 신뢰도는 부하, 작동조건 면에서 전자 부품의 그것보다 더욱 민감하며 작동시간만을 고려한 고장을 데이터는 신뢰성 예측에 있어서 부적절한 경우가 많다.

④ 고장의 치명도 선정 : 기계류 장비의 고장에 대한 정의는 전적으로 의도된 기능 내에서 관련성을 가져야 한다. 예를 들어 과도한 소음은 본래의 기능과 상반되는 치명적인 고장이라고는 말할 수 없다.

본 연구에서 제안하는 방법론에서는 전체 시스템에 대한 고장나무 분석을 통해서 얻을 수 있는 결과와 문제점, 그리고 이의 해결방안을 위한 function flow diagram 작성 및 이를 확장한 전체 시스템에서의 각 부품간 function network를 작성하고자 하는데 있다.

### 3.1 Fault Tree Analysis

본 연구의 사례인 NC Turning Machine 중에서 Sub-Assembly로 선정된 공구대의 개략적인 3차원 형상은 Fig. 4와 같다.



Fig. 4 3-D Tool Post Design

공구대의 기능은 가공에 필요한 공구를 선택하여 가공 위치로 이송하는 것이며 작동원리는 Fig. 5에서 볼 수 있듯이 유압 에너지로 구동되는 piston과 hydraulic motor의 해 직선운동과 회전운동을 하며 이들 운동은 각각 proximity sensor와 encoder에 의해 측정된다.

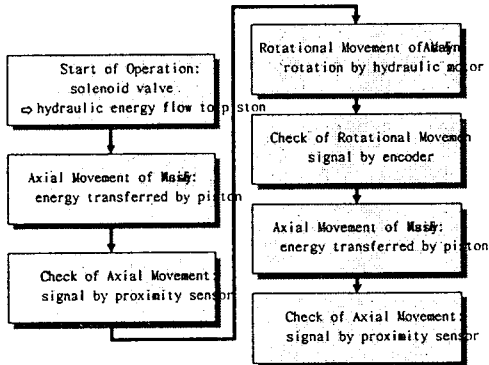


Fig. 5 Operation Sequence of Tool Post

Fig. 5로부터 대상 시스템의 작동 원리 및 특성을 파악할 수 있으며 이를 기반으로 한 고장나무분석은 Fig. 6과 같다.

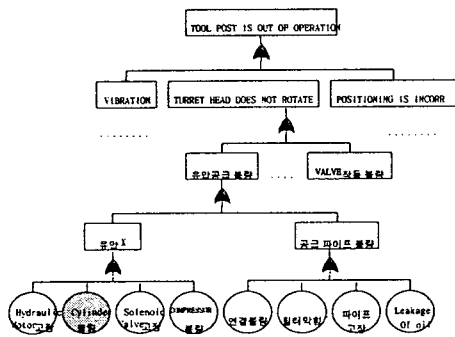


Fig. 6 Tool Post에 대한 Fault Tree Analysis

tool post의 작동불량이라는 사상을 최상위 사건으로 규정하고 이의 원인이 되는 차순위 사건을 tool post 자체의 진동과 turret head의 작동 불량 및 체결위치의 불량으로 파악하였다. 또한 turret head의 작동 불량을 유발하는 하위사상을 유압공급 불량과 valve 작동 불량 등으로 분해하였으며 이들에 대해서도 가장 기본적인 사상으로 분해할 수 있다.

이와 같은 고장나무분석에 의해 여러 사건이 모여 하나의 치명적 사건을 이루는 경로를 파악할 수 있지만 기계류 제품의 경우 용장성(redundancy)을 갖는 경우를 제외하고는 대부분 하나의 부품에서 고장이 발생하면 전체 시스템에 직접적으로 영향을 주는 직렬구조를 갖는다. 또한 최상위 사상인 시스템의 고장관점에 대한 분석자의 견해에 따라서 고장나무의 구조가 변경될 수 있기 때문에 그 자체의 일반적인 구조를 갖지 못한다.

Fig. 6에서의 Fault Tree는 모두 직렬구조를 가진 기본 사상으로 구성되어 있다. 각각의 기본 사상들은 이들의 상위사건에 직접적으로 영향을 미칠 수 있으나 과거의 데이터를 참조로 가장 큰 고장율을 가지는 'cylinder 불량'의 basic block을 critical part로 가정하였다. 'cylinder 불량'이라는 사건은 Fig. 7과 같은 유압공급 시스템의 기능에 영향을 미치며 이때 만약 basic block인 'cylinder 불량'에 대한 고장율 데이터가 근본적인 원인을 제공할 수 있는 고장수준에 이르지 못할 때에는 다른 대책을 강구해야 하며 본 논문에서는 고장나무분석과 상호보완적으로 활용될 수 있는 방법을 제시하고자 한다.

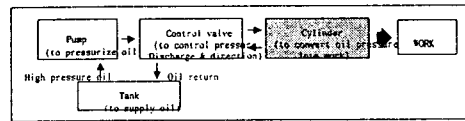


Fig. 7. Basic structure of a hydraulic drive system

### 3.2 부품간의 기능적 상호 관련성

전체 시스템의 기능은 단위 부품들의 기

능 조합으로 구성이 되며 각 부품, 혹은 부품들간의 관계는 Fig. 8과 같이 물질 흐름(material flow), 구조적 힘의 흐름(structural force flow), 에너지 흐름(energy flow), 및 정보 흐름(information flow)의 관점에서 시스템과의 상호 관련성을 파악할 수 있다. 즉, 유체(fluid), 기계/유압 에너지, 구조적 힘, 전기/전자 정보의 흐름 등을 이해하여 시스템의 기능적 신뢰도에 어떻게 영향을 미치는가를 평가할 수 있으며 본 연구에서는 구조적 힘의 흐름을 중심으로 논한다.

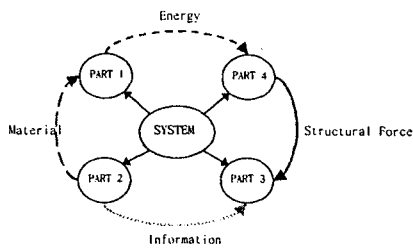


Fig. 8 부품간의 기능적 상호 관련성

### 3.2.1 Structural Force Flow Diagram

기계류 부품의 기본적인 기능은 Fig. 9에서 볼 수 있는 바와 같이 동작의 실현과 동력의 전달, 부품들간의 연결이며 이 때 각 부품들은 tension, compression, shearing, bending, twisting과 같은 형태의 내부, 혹은 외부적인 힘을 받게 된다[9]. 이러한 힘은 균형이 이루어질 때까지 각 부품과 이를 지지하는 각 파트로 전달되며 균형점을 넘어선 힘이 전달될 때에는 결국 과도한 스트레스로 인해 부품이 견딜 수 있는 한계를 벗어날 수 있으며 결국 고장이 야기된다.

Functions	Descriptions
Realize Motion	Translation Motion, Rotation Motion Conversion between Translation and Rotation
Sustain Force	Transmit Force, Close the Force Flow Loop, Contain Fluid
Transmit Force/Torque	Transmit Force/Torque, Change the Direction of Effort/Response
Stay in Position	Installation, Balance and Stability during Operation and Trip
Fix and Connect Machine Parts	Fix or Attach a Part, Connect Parts, Align one Part with Another
Connect with Other Machine	Connect One Machine with Another, Fix or Attach Machine
Supply Driving Energy	Supply Energy from an External Source, Generate Energy
Transmit Information	Sensing Capability, Data Transfer Protocol, Wiring

Fig. 9 Basic functions in a machine

만약 시스템이 의도된 기능을 충분히 수행할 수 있는 조건을 만족한다면, 즉 신뢰성이 확보된 시스템이라면 시스템 내부의 부품, 혹은 부품들간의 force의 흐름은 안정적인 상태라고 판단할 수 있다. Fig. 10은 hydraulic cylinder내에서 이루어져야 할 세부적인 기능들을 도시화한 것이다. 실린더의 측면부분은 force를 발생 및 전달하며 유체를 구속한다. 또한 실린더 내부의 피스톤은 force를 유발하며 고정된 공간 내에서 직선운동 및 힘을 전달한다[9].

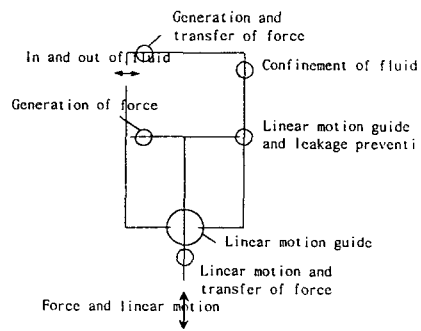


Fig. 10 Composition of functions required hydraulic cylinder

각각의 기능적 메카니즘을 명확하게 구분한 후 기능수행에 필요한 force의 흐름은 Fig. 11과 같이 표현될 수 있으며 force circuit diagram을 통해서 안정적인 상태에서의 force의 흐름과 고장형태를 예측할 수 있다.

피스톤의 상하운동에 의한 실린더 내부의 압력변화는 반복적인 force로 실린더에 전달되며 실린더가 견딜 수 있는 한계 이상의 스트레스(critical stress)가 가해진 경우 fatigue가 발생할 수 있다. 또한 실린더 내부와 피스톤간의 마찰에 의한 wear가 일어날 수 있다.

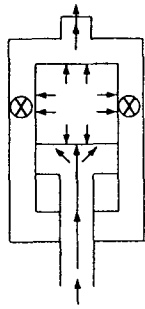


Fig. 11 Force Circuit Diagram

### 3.2.2 Function Network

고유의 기능들을 수행하는 각 부품들에 대한 force circuit diagram을 기반으로 이를 확장하여 전체 시스템에 대한 force의 흐름을 파악할 수 있다. Fig. 12는 tool post를 구성하고 있는 각 부품들을 분류한 후 전체 시스템의 고유기능을 구현하기 위한 관점에서 단위 부품들간의 상호작용을 기계적(mechanical), 유압(hydraulic), 및 조립(assembly)의 관계로 분류한 후 이들의 선후관계를 표시한 다이어그램이다.

단위 부품들의 작동과 관련된 상호 관련성은 기계(mechanical), 유압(hydraulic)적인 힘의 흐름의 관점에서 분석될 수 있으며, 이러한 힘의 흐름과 성분과 방향을 파악하여 선후관계를 분석하고 조립 관점의 경우에는 부품간의 조립여부를 Fig. 12와 같은 function network로 표현할 수 있다.

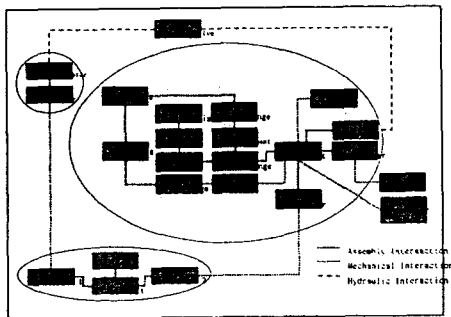


Fig. 12 Function Network

Fig. 12에서 hydraulic motor와 motor gear는 조립(assembly)의 관계로 나타낼 수

있으며 solenoid valve와 hydraulic motor는 유압(hydraulic)의 흐름, motor gear와 idle gear간의 관계는 기계적(mechanical) 상호작용으로 구성된다.

### 3.3 신뢰성 모델링

신뢰성 모델은 이를 구성하는 구성요소(component)의 연결방법에 따라 여러 관점에서 고려해 볼 수 있지만 Fig. 13과 같이 시스템을 구성하는 물리적 구성 부품을 그 기능별로 조합하여 전체 시스템에 대한 서브시스템으로 형성되는 function network로 표현하고 이를 기능의 성공, 혹은 실패 관점의 기능 블록 다이어그램(Function Block Diagram)으로 재구성할 수 있다[3,4]. 즉, function network 최상위 기능을 기능 블록 다이어그램의 정상사건(top event)으로 정의하고 최상위 기능을 구성하는 기계, 조립, 유압과 관련된 힘의 전달을 기능 블록 다이어그램 상의 정상사건을 유발하는 1차 원인으로 대응시킬 수 있다.

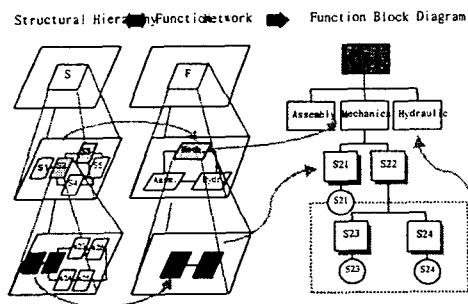


Fig. 13 Function Block Diagram derived from Structural Hierarchy and Force Network

function network가 시스템의 하위 부품을 각각 그 기능별로 조합하여 전체 시스템을 최상위 기능으로 두고 분석하는 상향식(bottom-up) 분석 모델이라고 한다면 function network의 최상위 기능을 정상사건(top event)이라 규정한 후 이에 대한 성공 혹은 실패의 원인을 차순위 기능으로, 더 나아가 그 기능에 요구되는 하위 부품으로 분해하는 방식의 기능 블록 다이어그램은 하향식(top-down) 모델이라 할 수 있다. 이러

한 function network와 기능 블록 다이어그램을 Fig. 14와 같이 시스템의 조립구조, 부품정보 등 전반적인 시스템 설계정보와 함께 연계시킨다면 신뢰성 측면에서 그 시스템의 장래성을 예측할 수 있는 모델로 인식될 수 있다.

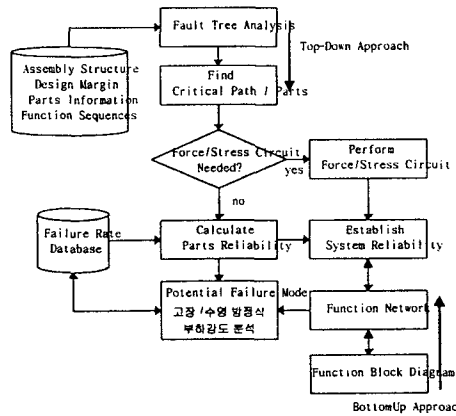


Fig. 14 신뢰성 모델링

#### 4. 결론 및 향후 연구방안

시스템의 설계가 완료된 후 사용단계에 있어서 제한된 한계 내에서의 소극적인 개선은 신뢰성의 큰 향상을 기대할 수 없기 때문에 초기 단계에서부터 설계안에 반영하려는 노력이 시작되어야 한다.

본 연구에서는 시스템을 구성하는 구성 부품을 그 기능별로 조합하여 전체 시스템에 대한 서브시스템으로 구성될 수 있는 기능 네트워크로 표현하고 이를 다시 기능 블록 다이어그램으로 구성하여 신뢰성 측면에서의 새로운 모델링 방법을 제시하였다.

기계류 부품에 대한 신뢰성 모델링은 설계도면상에 부품이 완성될 경우 예정된 기간 동안에 만족할 만한 신뢰성을 유지할 수 있는가를 예측하고 시스템의 설계 또는 생산을 실현할 수 있는 여러 가지 설계방안을 비교 및 선택할 수 있는 판단기준을 제공하며 어떤 특정한 설계 상에 존재하는 신뢰성 문제의 소재를 파악케 함으로써 설계의 지침이 된다는 점에 의의가 있다. 또한 이와 같은 노력은 제품에 대한 정확한 신뢰성 데이터가 활용될 수 있어야만 한다는 전제가

요구되며 이를 위해 제품을 구성하고 있는 기본 부품들에 대한 체계적이며 지속적인 데이터 획득 및 분석이 이루어져야 한다.

향후 연구과제로는 제품의 고장형태에 대한 신뢰성 분석을 함으로써 신뢰성 향상을 위한 경제적인 대책강구가 필요하며 Fig. 15에서와 같이 기능적 요구사항, 사용환경, 조립구조, 부품 정보 등 CAD 시스템의 입출력 정보를 기반으로 한 신뢰성 모델을 통해서 그 결과 값인 신뢰성 데이터를 가지고 신뢰성 디자인에 요구되는 자료로 활용될 수 있도록 다각적인 연계방안이 요구된다.

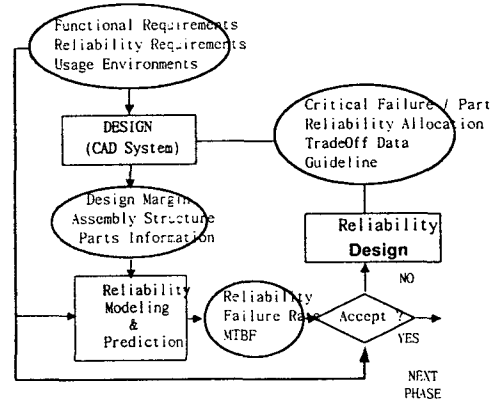


Fig. 15 신뢰성 모델링과 제품설계 연계방안

#### 5. 참고문헌

1. 박경수, *신뢰성 개론*, 영지문화사, 1994.
2. Takeshi Murayama, "A Cad System Based on Concurrent Processing of Product Modeling and Fault Tree Analysis", *Proc. of the Inter. Symp. on Optimization and Innovative Design*, pp. 162-164, 1997.
3. Mohammad Modarres, "Function Modeling of Complex System with Applications". *Proc. of the Annual of Reliability and Maintainability*, pp. 418-425, 1999.
4. M. Modarres, "Functional Modeling of Physical Systems Using the Goal Tree Framework". *AAAI-98 Workshop on*

*Functional Modeling and Teleological Reasoning*, Madison, WI, July 1998.

5. Patrick D. T. O'Connor, *Practical Reliability Engineering*, John Wiley & Sons, Third Edition Revised, pp. 163-167
6. Bennetts, R. C., "On the Analysis of Fault Tree", *IEEE Trans. on Rel.*, Vol. R-24, No. 3, 1975.
7. W. Grant Ireson, Clyde F. Coombs, Jr., Richard Y. Moss, *Handbook of Reliability Engineering and Management*, Mcgraw-Hill, Second Edition, 1996.
8. 신동범, 윤덕균, "FTA를 이용한 껌 자동 포장 기계 고장의 체계적 분석", *Journal of the KSQC*, Vol. 12, No. 1, 1984.
9. Yotaro Hatamura, *The Practice of Machine Design*, Oxford Science Publications, 1999.