대한기계학회 2001년도 춘계학술대회논문집 C pp. 333~338 KSME 01S339

신뢰성 분석을 위한 Function Tree 및 Fault Tree 구성 방법에 관한 연구

하 성도*. 이 언경*. 강 달모*

A Methodology for Constructing Function Tree & Fault Tree in Reliability Analysis

Sungdo Ha*, Eon-Kyung Lee* and Dal Mo Kang*

Key Words : Fault Tree Analysis(고장나무 분석), Reliability Analysis(신뢰성 분석), Function Deployment(기능전개)

Abstract

Fault tree is a widely used methodology for analyzing product reliability. The fault trees are usually constructed using the experiences of expert reliability engineers in top-down approaches and have different structures according to each expert's subjectivity. In this work it is tried to find a general method for the fault tree construction based on the function tree that is the result of product function deployment. Based on the function tree, the method has the advantage of resulting an objective fault tree since the faults are defined as the opposite concept of functions.

The fault tree construction of this work consists of the following steps: 1) definition of product primary function with the viewpoints of product operation and configuration, 2) construction of functional relation chart using a grouping algorithm, 3) abstraction of functional block diagram according to operation sequences and configuration of a product, 4) construction of function tree for each viewpoint, and 5) construction of fault tree by matching the function tree and simplification of the result.

1. 서 론

Fault Tree Analysis(FTA)란 하나의 제품 혹은 시스템의 고장을 최상위 사건으로 하여 그 고장을 일으킬 수 있는 가능한 모든 하위 사건을 Top-Down 형태로 분석하여 배열함으로써 Tree 형태의 도표를 만들고 이를 활용하여 제품 혹은 시스템의 신뢰성을 정량적 및 정성적으로 분석하는 방법이다. FTA 는 상위의 고장이 어떤 하나의 하위 고장 또는 하위 고장들의 조합에 의해서 발생하는가를 결정하는 데에 유용하게 사용되는 신뢰성 평가 기법으로서 설계 초기 단계에서부터 적용되어 제품의 잠재적 결점 및 설계상 내재된 위험요소를 파악하는 데에 사용된다. 또한 설계 변경과정이나 이미 생산된 제품의 수리에 있어서도 중요한 역할을 한다. FTA 에서 구성된 Fault Tree 는 설계자가 제품의 하위 특성을 변경함으로써 제품의 신뢰성 및 안전성을 충분히 평가할 수 있게 해 주는 유용한 도구가 된다.[1,2] FTA 는 설계 단계 전반에서 매우 유용하게 사용될 수 있으나 그 구성 방법에 있어서는 체계적 방법론이 없어서 실무자의 직관이나 경험에 의존하여 작성되어 왔다.

Contini 는 여러 방법론을 절충하여 체계화된 Fault Tree 를 작성하고, 이의 정성적, 정량적 분석을 준비하는 과정을 제시하였다.[3] Fault Tree 상의 각 고장들 사이의 위계 구조를 정의하고 그 구조에 따라 Minimal Cut Set 을 찾아 동일하게 명명된 Tree 구성 요소를 제거 함으로써, Tree 구조를 간단히 할 수 있다. 이 연구는 그러나 Fault Tree 자체를 작성하는 방법은 생략된 채 이미 만들어진 Tree 를 정리, 분석하는 방법만을 제시한 것 이라고 볼 수 있다.

* 한국과학기술연구원 CADCAM 연구센터

제품의 기능 이해를 위한 이 et al.의 연구에서는 Function Tree 구성을 위한 준비 단계로서의 기능 전개 방법 및 전개된 단위 기능간 관계 설정이 다루어져 있다.[4] 본 연구에서는 여기에 제시된 제품의 Module 화 방안 및 각 Module 의 내부 구성 부품의 기능과 상호 관계파악의 방법론을 따르기로 한다. 기능 전개가 이루어진 후에는 이를 통해 Function Tree 를 구성하게 되는데, 하 et al.의 연구에서는 기능 전개에 의해 얻어진 Block Diagram 에 Brainstorming 기법을 이용하여 발생 가능한 Fault 를 추가하여 초보적인 수준의 Fault Tree 가 구성되는 모습을 보였다.[5] 기존의 다른 연구에서와는 달리 Function/Fault Tree 를 구성함에 있어서 계층적 전개 방식을 채택하여 보다 체계적인 형태를 갖추었다.[3]

위에서 기술된 기존 연구의 Fault Tree 는 Top-down 형식으로 최상위 고장으로부터 순차적으로 하위 단계를 추론하여 전문가의 주관적인 의견에 따라 상이한 Fault Tree 가 구현된다. 그러나 본 연구에서의 Fault Tree 는 제품 기능 전개에서 도출된 기능 관계도의 정보를 이용한 Function Tree 를 활용하므로 객관적이고 체계적으로 구성된다. 단위 부품의 기능으로 구성된 Function Tree 를 활용하여 도출된 Fault Tree 는 용이하게 고장을 정의할 수 있다. 왜냐하면 Function Tree 의 하나의 기능에 대하여 상대적인 고장을 정의하여 Fault Tree 에서의 단위 고장이 정의되기 때문이다. 제품 기능 전개의 결과를 활용하여 Fault Tree 를 구성하는 과정을 객관적으로 수행하므로 Fault Tree 전문가의 경험과 지식에 대한 의존도가 적어질 수 있는 장점이 있다.

2. Fault Tree 구성 방법

본 연구에서 제안하는 Fault Tree 구성 방법은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 5 단계로 구성된다.

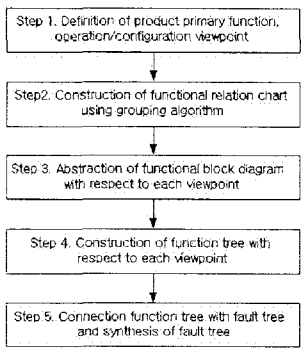


Fig. 1 Steps of Fault Tree Construction

Step 1. 제품의 주요기능(Primary Function)을 정의하고 정의된 기능을 구현하기 위해서 필요한 기능(Operation)과 구성(Configuration)을 파악한다. Fig. 2 에 보인 바와 같이 일반적으로 기능을 분석하기 위하여 물질 흐름(Material Flow), 에너지 흐름(Energy Flow), 정보 흐름(Information Flow)의 관점에서 input, output 을 분석하며 구성의 분석을 위하여 일체로 구성된 조립(Rigid Assembly)과 이들간의 상대적 운동이 가능한 조립(Non-Rigid Assembly)으로 나눈다.

파악된 기능과 구성과 관련이 있는 주요 부품(Key Parts)들을 BOM 정보에서 추출하여 제품 구성도를 작성한다. 부품의 단위 기능을 설계자의 Know-how 를 활용하여 정의하고, 단위 기능들 사이의 상호 관련성을 분석하여 From-To Relation Table 에 표시한다.[5]

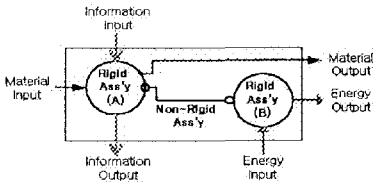


Fig. 2 Definition of Product Primary Function

Step 2. 그룹화 알고리즘을 통하여 제품의 기능구성도(Functional Relational Chart)를 작성한다.[5] Fig. 3 의 예에 나타난 제품의 기능구성도에 나타난 기능은 1) 외부에서 투입된 물질이 a2 와 a3 의 변환을 통해서 외부로 배출되고, 2) 외부에서 a1 에 전달된 정보를 실행한 후 외부로 실행된 결과를 전달하고, 3) 외부에서 투입된 에너지가 b2 와 b3 의 변환을 통해서 외부로 배출되는 기능 들이다. 부품들의 구성관계는 'a1, a2, a3'와 'b1, b2, b3'는 각각 일체로 조립되어 서로 상대 운동을 하는 구성으로 이루어져 있다.

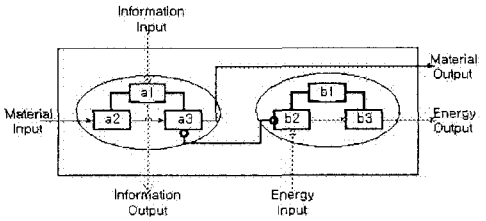


Fig. 3 Functional Relation Chart

Step 3. 제품의 기능 순서를 참조하고 제품 구성에 따라 기능 구성도에서 '기능 블록 다이어그램'을 추출한다. 한 예로서 에너지 관점의 '기능 블록 다이어그램'은 기능 전개도에서 에너지 흐름의 기능 순서인 에너지 투입(Energy Input), 에너지 변환(Energy Transformation), 에너지 배출(Energy

Output)에 따라 Fig.4 와 같이 구성된다.

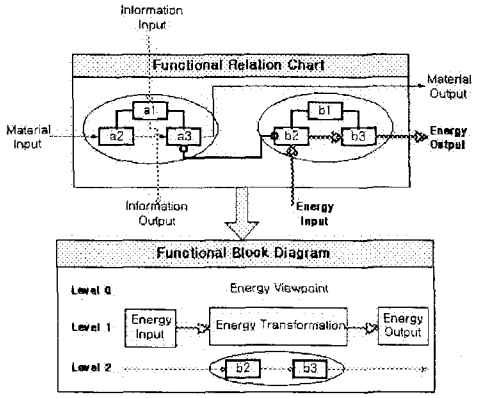


Fig. 4 Functional Block Diagram with respect to Energy Viewpoint

Step 4. 각각의 관점에 따라 얻어진 블록 다이어그램을 바탕으로 Function Tree 를 구성한다(Fig. 5 참조). 에너지 흐름이라는 고유 기능이 Function Tree 에서의 'Level 0' 기능이 되고, 에너지 흐름의 각 동작 순서, 즉 에너지 투입, 에너지 변환, 에너지 배출의 기능들이 각각 Function Tree 의 'Level 1' 기능들이 된다. Fig. 4 의 'Level 2'에서 '외부→b2'의 기능이 'Energy Input'의 'Level 2' 기능이 되고, 'b2, b3'의 각각의 기능들이 'Energy Transformation'의 'Level 2' 기능이 되며, 'b3→외부'의 기능이 'Energy Output'의 'Level 2' 기능이 된다.

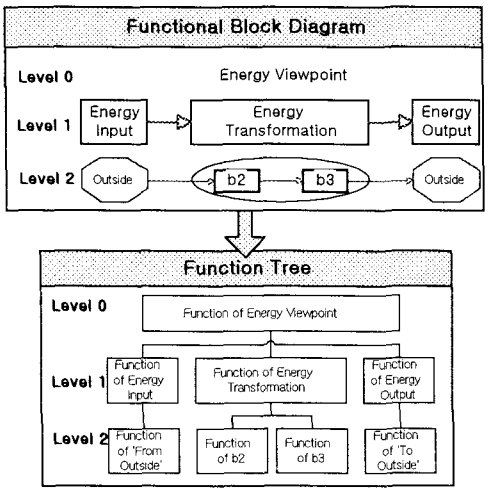


Fig. 5 Function Tree Construction with respect to Energy Viewpoint

Step 5. Step 4 에서 얻어진 Function Tree 를 기반으로 Fault Tree 를 작성하고 이들을 통합하여 제품의 Fault Tree 를 구성한다. 이 과정에서 Function Tree 의 각 Level 의 Function Block 에 대한 '역기능'이 Fault Tree 의 각 Level 의 Fault 로 정의된다. Fig. 6 에 나타난 바와 같이 Function Tree 의 Level 2 의 'b2 의 기능'이 잘못되었을 때 나타나는 현상과 원인을 기술 한 것이 Fault Tree 의 Level 2 의 'b2 의 고장'이 된다.

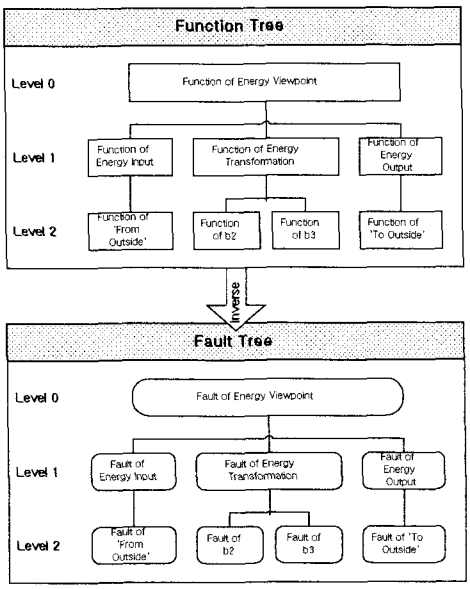


Fig. 6 Fault Tree Construction with respect to Energy Viewpoint

각각의 기능과 구성 관점의 Fault Tree 들을 하나의 Fault Tree 에 통합하여 표현하고, Level 0 의

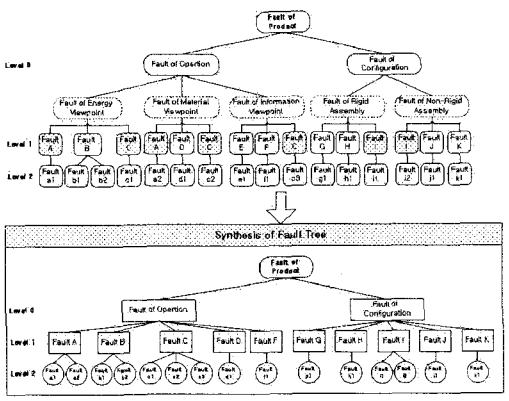


Fig. 7 Synthesis of Fault Tree

에너지 흐름, 물질 흐름, 정보 흐름의 고장은 기능 관점의 고장으로 통합하고, Rigid Assembly 와 Non-Rigid Assembly 에 대응하는 고장은 구성 관점의

고장으로 통합한다. 기능 관점과 구성 관점 각각의 Level 1 의 고장들 중에서 동일한 고장이 중복되어 파악된 경우에는 중복된 고장을 삭제한다. 예를 들어 Fig. 7 과 같이 기능 관점에서 살펴보면 Level 1 에 'Fault A'라는 같은 고장이 존재하므로 Level 2 의 'Fault a1'과 'Fault a2'가 'Fault A'의 고장 원인으로 통합된다.

3. Fault Tree 구성 사례

본 연구에서는 냉각 사이클의 구성에 사용되는 스크롤 컴프레서를 대상으로 앞장에서 제시된 방법론을 적용하여 Fault Tree 를 구성한다.

- 부품의 주요 기능 정의 및 관련 부품간 관계도 작성

Scroll Compressor 는 30 여 개의 부품으로 구성된다. 여기서는 이러한 부품들을 구성 단위 및 기능에 따라 Fig. 8 에 나타낸 바와 같이 20 개 부품과 3 개의 부품군으로 정의한다.

A	Discharge valve ass'y	1,3,4 ,5,6	Discharges the compressed refrigerant and prevents backward flow	M	Balance weight	17, 19	Absorbs vibration by O. scroll's motion
B	Bolt	2	Supports scrolls by binding parts together	N	Rotor	18	Rotates in the magnetic fields created by stator ass'y
C	Fixed scroll	7	Compresses refrigerant	O	Stator ass'y	20	Transforms electrical energy to magnetic field
D	Orbiting scroll	8	Compresses refrigerant	P	Top cap	21	Forms the skin and Seals
E	Oldham ring	9	Guides O. Scroll's movement	Q	Discharge tube	22	Transmits compressed refrigerant
F	Main frame	10	Supports the movement of shaft and O. ring	R	Discharge cover	23	Protects discharge valve assembly
G	Slide bush	11	Prevents wears bet/ shaft and O. Scroll	S	Baffle	24	Regulates flow direction of refrigerant
H	Crank shaft	12	Transmits rotating movement to O. scroll	T	Suction tube	25	Transmits refrigerant
I	Oil propeller	13	Supplies lubricants bound to Crank Shaft	U	Case	26	Forms the skin and Seals
J	Lower frame	14	Supports the Rotating movement of shaft	V	Base	27	Supports the whole compressor body
K	Thrust plate	15	Prevents wears bet/ shaft and L frame	W	Power Connection assy	28,29,30	Receives electricity
L	O-ring	16	Prevents O-ring from derailing				

Fig. 8 Part List Definition

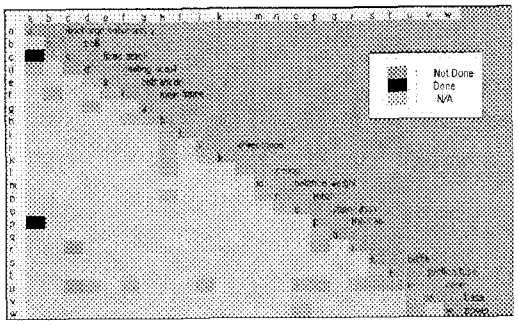
•구성부품의 기능 정의 및 From-To Relation Table 작성

Scroll Compressor 의 경우 전체 제품의 기능과 부품의 개별 기능, 부품간 상호 관계에 따라 기능을 Energy flow, Material flow 로 정의하고 구성은 Rigid/Non-Rigid Assembly 로 정의하여 그 관계성을 Fig. 9 의 예와 같이 표 하단의 Score 로써 표시한다. Score 0 는 해당하는 항목의 관계가 없음을 나타내며, 1 은 그 관계가 존재함을 의미한다. 그림의 예에서는 부품 G(Slide Bush)에서 부품 D(Orbiting Scroll)로의 에너지 전달이 존재하며, 또한 Non-Rigid 결합관계가 존재함을 알 수 있다.

단위 부품들 사이의 기능과 구성에 있어서의 상호관련성을 정의하고 이를 Fig. 9 와 같이 From-To Relation Table 에 표현한다.

- 그룹화 알고리즘을 이용한 제품의 기능구성도 작성

각 관점별로 작성된 From-To Relation Matrix 에 그룹화 알고리즘을 적용하여 제품의 기능 구성도를 작성한다. Fig. 10 은 Scroll Compressor 의 기능 중에서 Material Flow 관점에서 정의된 기능 구성도이며, Fig. 11 은 이러한 관점별 기능 구성도를 통합하여 나타낸 것이다.



DG	Orbiting Scroll(D) and Slide Bush(G)				
Function of Orbiting Scroll	Assembled to Crank Shaft, compresses induced low pressure refrigerant with F. Scroll				
Function of Slide Bush	Placed in bet/ Crank Shaft and O. Scroll, prevents wears				
Interaction	Rotating kinetic energy is transmitted to O. Scroll by the contacts and relative motions of Slide bush and O. Scroll				
Score		Energy Flow	Material Flow	Rigid assembly	Non-rigid assembly
	D→G	0	0	0	1
	G→D	1	0		

Fig. 9 Interaction Definition and From-to Relation Table

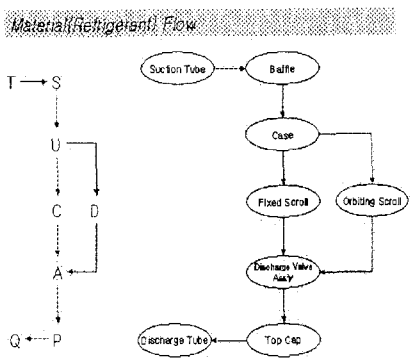


Fig. 10 Material Flow Relation Chart

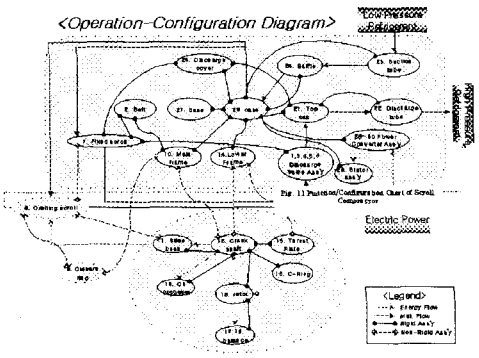


Fig. 11 Function/Configuration Chart of Scroll Compressor

● 관점별 Function Tree 구성 및 Fault Tree 구성

Fig. 11 의 기능 구성도를 기반으로 하여 Fig. 12 와 같이 각각의 Level 에 따른 기능을 정의하고 이를 활용하여 Fig. 13 과 같이 Fault 를 정의한다. Fig. 14 는 Material Flow 관점에서의 Function Tree 의 한 예이며 Fig. 15 는 이에 대응하는 Fault Tree 의 한 예이다.

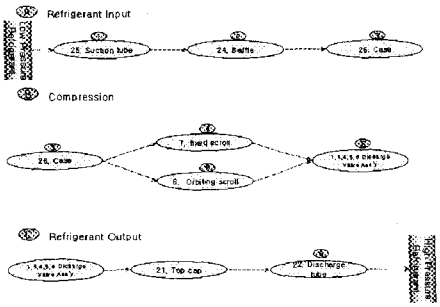


Fig. 12 Function Definition in Each Level

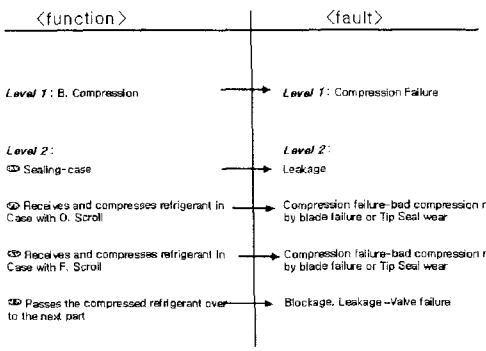


Fig. 13 Fault Definition

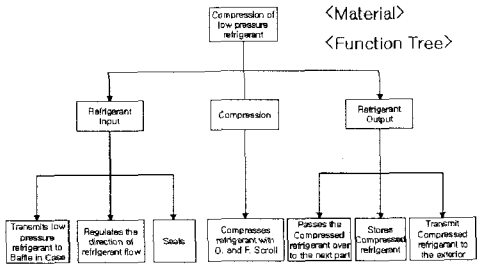


Fig. 14 Function Tree

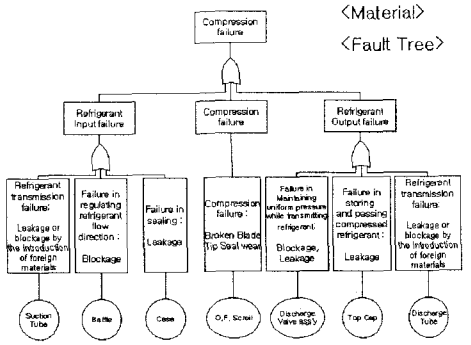


Fig. 15 Fault Tree

● Fault Tree 의 통합 구성

Scroll Compressor 의 경우 이런 식으로 네 개의 Fault Tree 를 작성하게 되며, 기능과 구성의 두 가지 관점으로 크게 나뉘게 된다. 서로 다른 관점에 의해 전개된 Fault Tree 는 그러나 다른 Tree 와 동일한 entry 를 가지게 되는 경우가 있다. 이런 경우 같은 내용의 중복을 피하고, Tree 구조를 단순화 시키기 위한 통합과정이 필요하며 Fig. 16 은 통합된 결과를 나타낸다.

4. 결 론

Fault Tree Analysis 는 제품 혹은 시스템의 신뢰성을 분석하는 방법으로 매우 유용하게 쓰이는 방법이며 Fault Tree 는 고장을 일으키는 모든 하위 사건을 Top-Down 형태로 분석하여 고장의 원인과 영향을 체계적으로 분석하여 표현한 것이다. 이러한 FTA 는 제품 설계 단계 전반에서 매우 유용하게 사용되는 방법이지만 Fault Tree 의 구성에는 체계적인 방법이 없어 실무자의 경험과 주관에 따라

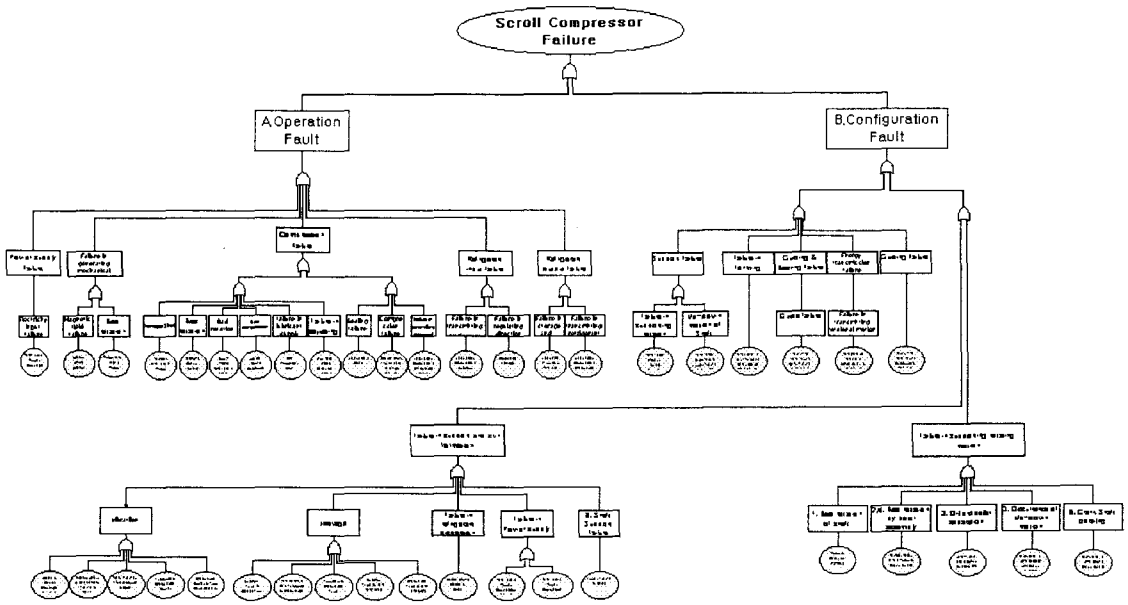


Fig. 16 Fault Tree for Scroll Compressor

구성 결과가 상이하다는 어려움이 있다. 본 논문에서는 제품의 고유 기능을 제품을 구성하는 부품 혹은 부품군의 단위 기능으로 분해하여 구성되는 Function Tree 를 이용하여 Fault Tree 를 구성하는 체계적인 방법을 개발하였다. 단위 기능에 대응되는 고장들을 이용하여 Fault Tree 를 구성함으로써 Fault Tree 의 구성이 객관화될 수 있으며 Bottom-Up 형태로 구성되어 고장들의 인과관계를 용이하게 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 신뢰성 분석에 있어서 각각의 Fault 에 해당하는 세부 부품의 파악이 용이하므로 신뢰성 향상을 위한 설계 개선을 위한 활용이 가능하다.

향후 연구내용으로는 개발된 Fault Tree 구성 방법의 시스템 구현과 제품의 신뢰성 설계에 반영하기 위하여 구성된 Fault Tree 를 활용하여 제품의 신뢰성을 정량적으로 분석하는 방법의 연구이다.

참고문헌

(1) Mahar, D. J., Wilbur J. W., 1990, "Fault Tree Analysis Application Guide", Reliability Analysis Center, pp. 1~55.

(2) 하성도, 이두영, 2000년 4월, "기계류 부품 신뢰성 모델링에 관한 연구", 2000년 춘계 학술대회 발표논문집, 한국신뢰성학회, pp. 223~230.

(3) Contini S., 1995, "A new hybrid method for fault tree analysis", Reliability Engineering and System Safety 49, pp.13~21.

(4) 이언경, 박선주, 강달모, 하성도, 2001년 4월, "제품 기능 전개 방법에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 18권 4호, pp.55~63.

(5) 하 성도, 이 언경, 박 선주, 강 달모, 2000년 10월, "기능 전개 결과를 이용한 Function Tree구성에 관한 연구", 2000년도 추계학술대회 논문집, 한국정밀공학회, pp.401~406.