

기능 전개를 활용한 기계류 부품의 Fault Tree 구성에 관한 연구

하 성도* · 이 언경* · 강 달모*

Fault Tree Construction Method using Function Deployments of Machine Parts

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

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

Abstract

In the analysis of product reliability, the fault tree is widely used since it shows the interrelations of the faults that lead to the product fault. A top-down approach based on experts' experience is commonly used in the fault tree construction and the trees often take different forms depending on the intent of the analyst. In this work it is studied how to construct fault trees with the utilization of function trees obtained from analyzing the functions and sub-functions of products in order to suggest a generic way of fault tree construction. The function tree of a product is obtained by analyzing basic functions comprising the product main function in a bottom-up approach so that it enables to construct an objective fault tree. The fault tree for a scroll compressor is shown as an example.

1. 서 론

Fault Tree Analysis(FTA)는 제품 혹은 시스템의 고장을 최상위 사건으로 하여 그 고장을 유발시키는 모든 하위 사건을 Top-Down 방식으로 분석하여 배열하고 이들을 Tree 형태의 도표를 만들어 제품 혹은 시스템의 신뢰성을 정량적 및 정성적으로 분석하는 방법이다. FTA는 상위의 고장이 어떤 하나의 하위 고장 또는 하위 고장들의 조합에 의해서 발생하는가를 판단하는 데에 매우 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.[1,2] FTA는 설계 단계 전반에서 매우 유용하게 사용될 수 있으

나 그 구성 방법에 있어서는 체계적 방법론이 없어서 실무자의 직관이나 경험에 의존하여 작성되어 왔다.

Contini[3]는 여러 방법론을 절충하여 체계화된 Fault Tree를 작성하고, 이의 정성적, 정량적 분석을 준비하는 과정을 제시하였는데, Fault Tree 상의 각 고장들 사이의 위계 구조를 정의하고 그 구조에 따라 Minimal Cut Set을 찾아 동일하게 명명된 Tree 구성 요소를 제거 함으로써, Tree 구조를 간단히 할 수 있음을 보이고 있다. 그러나 이 연구에서는 Fault Tree를 작성하는 방법은 생략된 채 이미 만들어진 Tree를 정리, 분석하는 방법만을 제시하고 있다.

제품의 기능 이해를 위한 이 등[4]의 연구에서는 Function Tree 구성을 위한 준비 단계로서 기능 전개 방법 및 전개된 단위 기능간 관계 설정을 다루었는데, 본 연구에서는 여기에서 제시된 제품의 Module화 방안 및 각 Module의 내부 구성 부품의 기능과 상호 관계파악의 방법론을 따르기로 한다. 기능 전개가 이루어진 후에는 이를 통해

* 한국과학기술연구원 CAD/CAM 연구센터

Function Tree 를 구성하게 되는데, 하 등[5]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. 기존의 다른 연구에서는 Function/Fault Tree 를 구성함에 있어서 계층적 전개 방식을 채택하여 보다 기존의 연구보다는 체계적인 형태를 갖추었다.[3]

위에서 기술된 기존 연구의 Fault Tree 는 실행자의 의도에 따라 상이한 내용과 형태를 가지게 될 수도 있다. 그러나 본 연구에서 제시하는 방법론에 의한 Fault Tree 는 제품 기능 전개[4]에서 도출된 기능 관계도의 정보를 이용한 Function Tree 를 활용하므로 Fault Tree 가 보다 객관적이고 체계적으로 구성된다. 단위 부품의 기능으로 구성된 Function Tree 를 활용하여 도출된 Fault Tree 를 구성하는 것은 매우 용이하다. 왜냐하면 Function Tree 상의 하나의 기능에 대하여 하나의 상대적인 고장을 정의하여 Fault Tree 를 구성하게 되어 Function Tree 와 Fault Tree 가 사실상 같은 형태의 Tree 구조를 가지게 되기 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.

또한 본 연구에서는 기계류 제품의 기능 구성을 작동(Operation) 및 구성(Configuration)의 크게 두 가지 관점에서 살펴본다. 기계류 부품의 경우 개별 부품 하나 하나가 기능하기도 하지만, 다른 부품과의 조립(또는 연결)관계에 의해서만 그 기능 또는 고장이 발현되는 경우가 많기 때문이다.

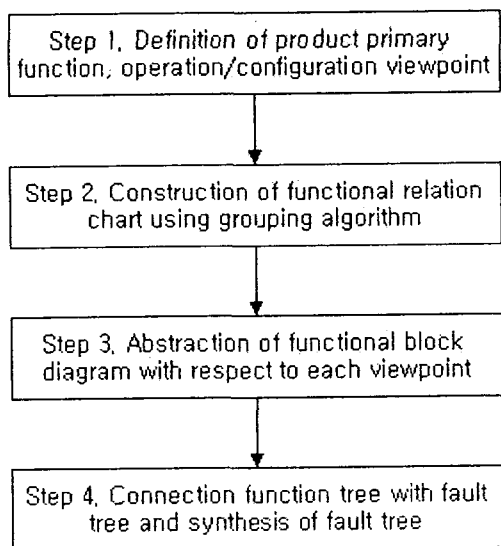


Fig. 1 Steps of Fault Tree Construction

2. Fault Tree 구성 방법

본 연구에서 제안하는 Fault Tree 구성 방법은 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 4 단계로 구성된다.

Step1. 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, 구성(Configuration) 의 분석을 위하여 일체로 구성된 조립 (CLA: Configuration as Lumped Assembly) 과 이들간의 상대적 운동이 가능한 조립 (CRM: Configuration with Relative Motion) 으로 나누어 고려한다.

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]

Step2. 그룹화 알고리즘을 통하여 제품의 기능 구성도(Functional Relational Chart)를 작성한다. Fig. 3 의 제품의 기능 구성도에 나타난 기능은 1) 외부에서 투입된 물질이 a2 와 a3 를 거쳐 변환된 후 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 구성 관계는 'a1, a2, a3'와 'b1, b2, b3'는 각각 일체로 조립(CLA)되며, 각각의 그룹은 서로 상대 운동을 하는 구성(CRM)으로 이루어져 있다.

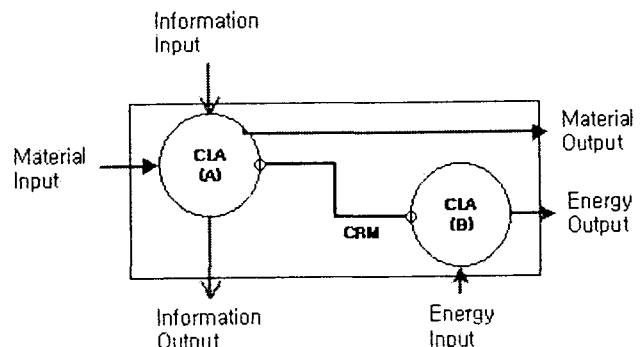


Fig. 2 Definition of Product Primary Function

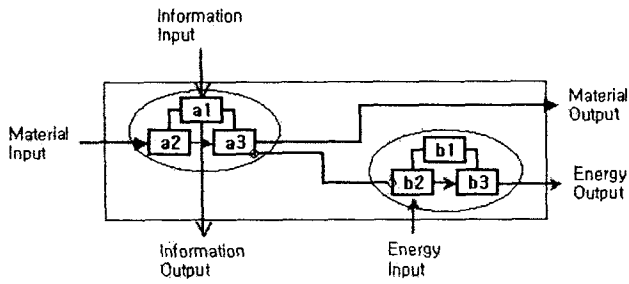


Fig. 3 Functional Relation Chart

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.

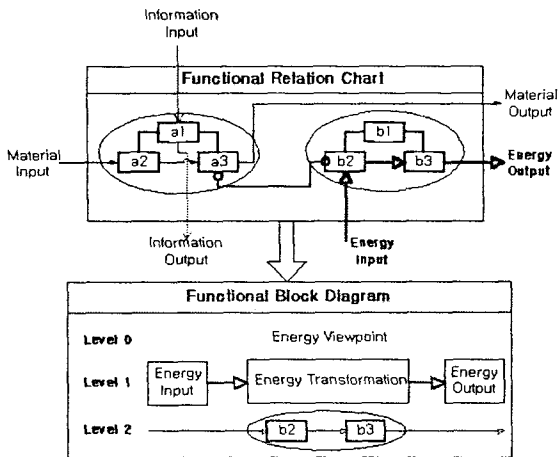


Fig. 4 Functional Block Diagram with respect to Energy Viewpoint

구성(Configuration)의 측면에서 위와 같은 방법으로 Functional Block Diagram 을 얻는 방법이 Fig. 5 에 제시되어 있다. 형태적으로는 동일하지만, 조립의 경우 input 과 output 의 개념이 없으므로 Level 1 에서 모든 기능정의가 가능하다. 단, 기능(Operation)관점과는 달리 각각의 부품이 아닌 부품간의 관계가 핵심 기능으로 정리된다.

Step 4. 각각의 관점에 따라 얻어진 블록 다이어그램을 바탕으로 Function Tree 를 구성한다 (Fig. 6 참조). 여기에서는 에너지 흐름을 예로 들어 서술한다. 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.

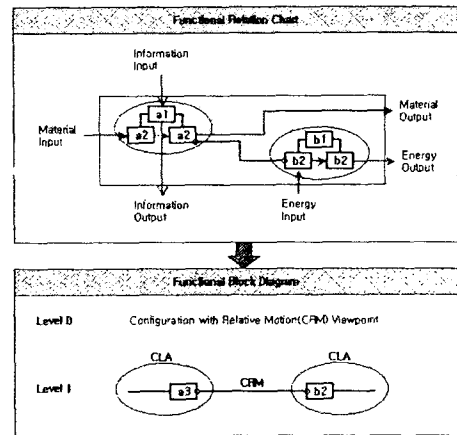


Fig. 5 Functional Block Diagram with respect to CRM Viewpoint

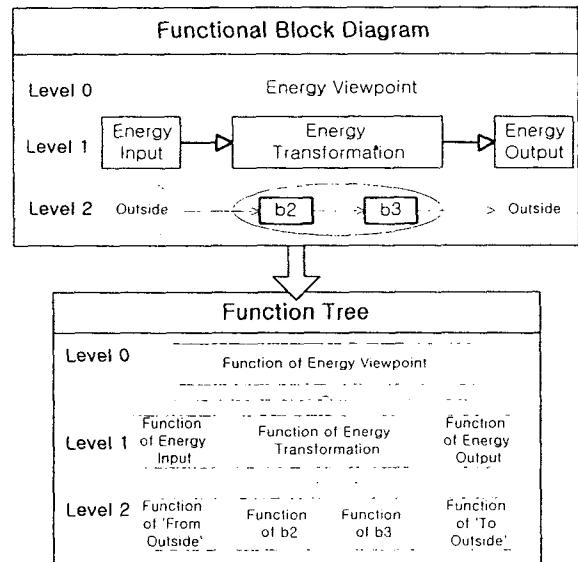


Fig. 6 Function Tree Construction with respect to Energy Viewpoint

이렇게 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 ‘역’이 Fault Tree 의 각 Level 의 Fault 로 정의된다. Fig. 7 에 나타난 바와 같이 예를 들어 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. 이 때 정확한 Fault Tree 를 얻기 위해서 보다 엄밀한 Function Tree(또는 기능 전개)를 하는 것이 중요하다.

각각의 기능과 구성 관점의 Fault Tree 들을 하나의 Fault Tree 에 통합하여 표현하고, Level 0 의 에너지 흐름, 물질 흐름, 정보 흐름의 고장은 기능 관점의 고장으로 통합하고, CLA 와 CRM 에 대응

하는 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. 8 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 고장원인으로 통합된다. Step 4 의 수행과정에서 Operation 관점에서는 위의 방법론을 그대로 따르면 되나, 뒤에 Configuration 관점을 다룰 때에는 Fault 의 중복을 피하기 위해 해당되는 Fault 가 Operation 관점과 Configuration 관점에 모두 속할 경우 어느 한 쪽을 선택하여야 한다. Configuration 관점에 대한 Function 및 Fault 의 정의가 끝나면 위 Fig 7, 8 에 제시된 것과 같은 방법으로 Fault Tree 를 구성할 수 있다.

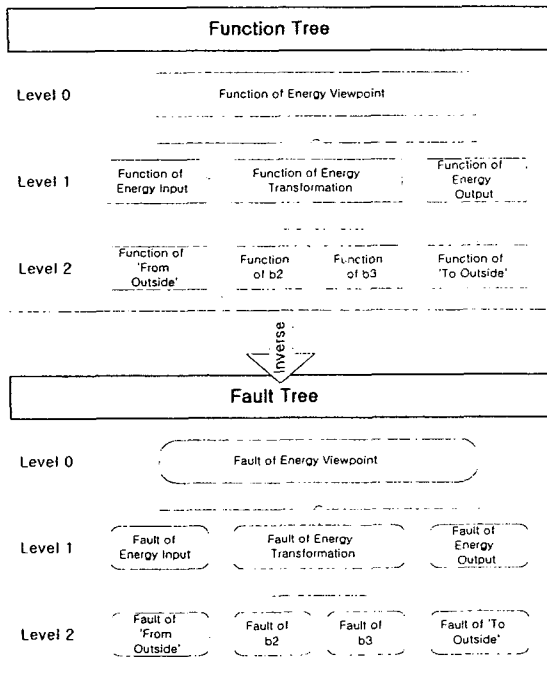


Fig. 7 Fault Tree Construction with respect to Energy Viewpoint

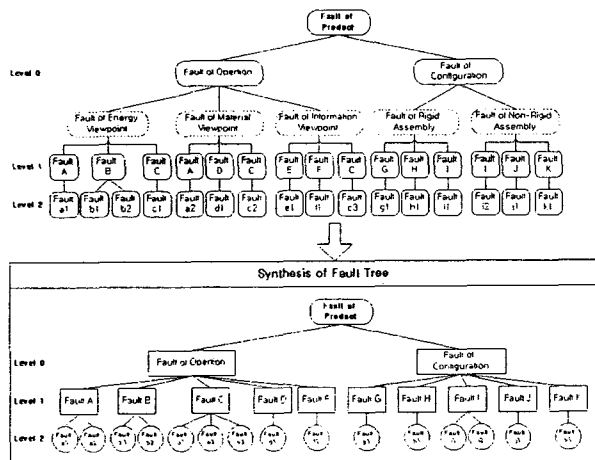


Fig. 8 Synthesis of Fault Tree

3. Fault Tree 구성 사례

본 장에서는 냉각 사이클의 구성에 사용되는 Scroll Compressor 를 대상으로 앞 장에서 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. 9 에 정리된 것과 같이 23 개 부품 (군)으로 정의한다.

A	Discharge valve assy	1, 3, 4, 5, 6	일국되어 밀착된 압력에 도 밀한 상태를 배출하고 상태 의 회복을 임치	M	Balance weight	17, 19	orbiting scroll의 회전 운동 에 의한 진동을 흡수
B	Bolt	2	fixed scroll이 main frame 을 조립시켜 scroll과 지지 에 상태를 임치	N	Rotor	18	stator에 의해 형성된 전지 기능 내에서 회전
C	Fixed scroll	7	orbiting scroll의 복을 이루 어 상태를 임치	O	Stator assy	20	스기(에너지)를 전지(가압)로 변환시킴
D	Orbiting scroll	8	crank shaft와 조립되어 fixed scroll과 복을 이루 어 임치된 상태 임치	P	Top cap	21	외관 구성 및 밀봉
E	Oldham ring	9	orbiting scroll의 회전운동 을 안내	Q	Discharge tube	22	일국된 상태를 외부로 전달
F	Main frame	10	crank shaft의 Oldham ring 의 운동용 지지	R	Discharge cover	23	discharge valve assy 조립
G	Slide bush	11	회전하는 crank shaft의 orbiting scroll 지지에서 미 오 방지	S	Ballie	24	냉매의 흐름 방향 조절
H	Crank shaft	12	rotor에 회전되어 회전운동 을 crank부를 흡사하여 orbiting scroll의 회전운동 에 전달	T	Suction tube	25	사일(냉매)을 compressor에 유입시키는 용구
I	Oil propeller	13	축에 조립되어 분할유 공급	U	Case	26	외관 구성 및 밀봉
J	Lower frame	14	crank shaft의 회전운동용 지지	V	Base	27	compressor의 세로 지지 부품의 조립
K	Thrust plate	15	crank shaft와 lower frame 사이에서 미 오 방지	W	Power Connection assy	28, 29, 30	외부의 전기를 받아들이는 곳
L	C-ring	16	crank shaft의 미팅 방지				

Fig. 9 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 CLA/CRM 으로 정의하여 그 관계성을 Fig. 10 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 CRM(Configuration with Relative Motion) 조립관계가 존재함을 알 수 있다.

단위 부품들 사이의 기능과 구성에 있어서의 상호관련성을 정의하고 이를 Fig. 10 과 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. 11 은 Scroll Compressor 의 기능 중에서 Material Flow 관점에서 정의된 기능 구성도이며, Fig. 12 는 CRM 관점에서의 연결관계를 그룹화 한 것이다. Fig. 13 은 이러한 관점별 기능 구

성도를 통합하여 나타낸 것이다.

DG	Orbiting Scroll(D) and Side Bush(G)				
Function of Orbiting Scroll	Crank Shaft(Slide Bush)와 조립되어 Fixed Scroll과 작용 이루어 유입된 냉매를 압축함				
Function of Slide Bush	회전하는 crank shaft와 orbiting scroll 사이에서 마모 방지				
Interaction	Slide Bush가 Orbiting Scroll에 로스, 상대운동 하며 Crank Shaft의 회전운동 원너 힘을 Orbiting Scroll로 전달				
Score		Energy Flow	Mechanic Flow	DLA	CPM
	D → G	0	0	0	1
	G → D	1	0	0	1

Fig. 10 Interaction Definition and From-to Relation Table

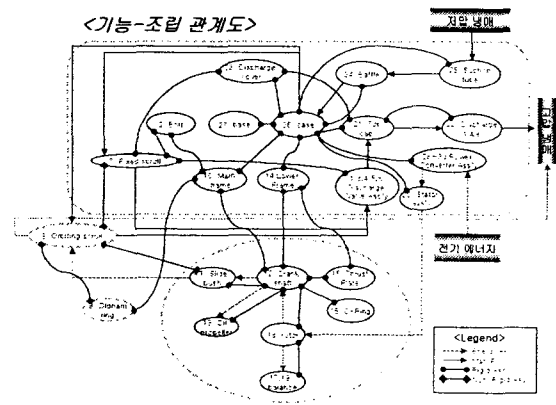


Fig. 13 Function/Configuration Chart of Scroll Compressor

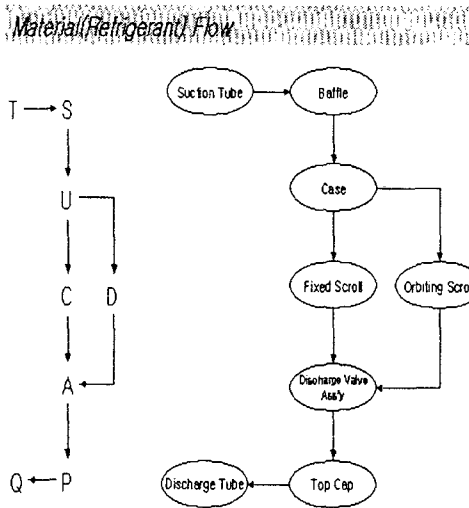


Fig. 11 Material Flow Relation Chart

관점별 Fault Tree 구성

Fig. 13의 기능 구성도를 기반으로 하여 Fig. 14와 같이 각각의 Level에 따른 기능을 정의하고 이를 활용하여 Fig. 15와 같이 Fault를 정의한다. Fig. 14 및 15를 통하여 각 관점별 Function Tree를 구성할 수도 있으나, Fault Tree만을 목적으로 할 경우 굳이 Function Tree를 구성하지 않아도 Fault Tree를 구성할 수 있다. 단, Function Tree 구성을 통해 Fault Tree 구성을 행할 경우 각 Fault 간의 기능적 위계 관계를 정확히 파악할 수 있는 장점이 있다.

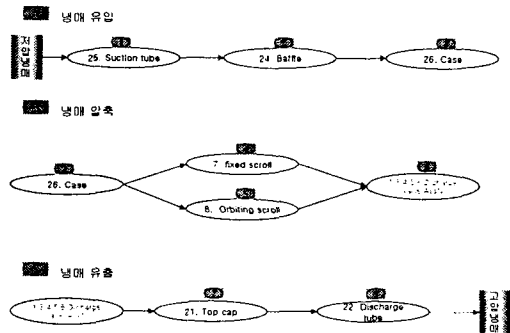


Fig. 14 Function Definition in Each Level

관점별 그룹 : 3. Configuration with Relative Motion(CRM)

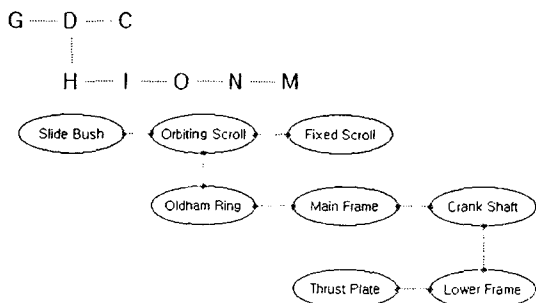


Fig. 12 CRM Relation Chart

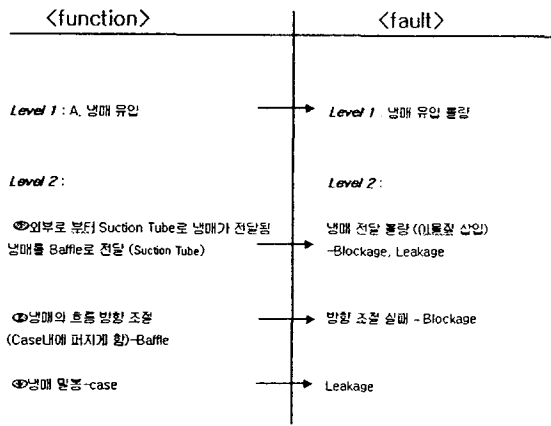


Fig. 15 Fault Definition (Material Flow)

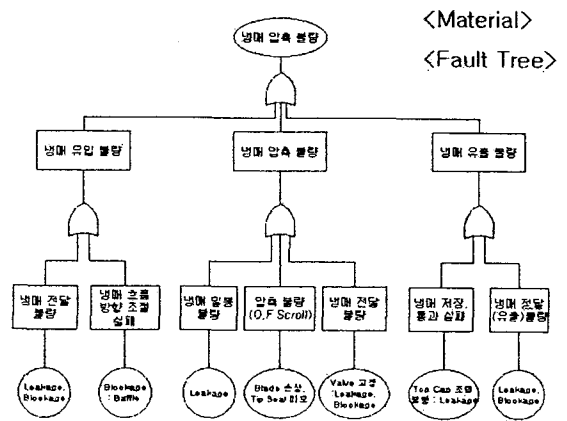


Fig. 18 Fault Tree (operation : Material Flow)

Configuration 관점에서의 예로 CRM(그림 12 참고)을 같은 방법으로 다루어 보면 다음과 같다.

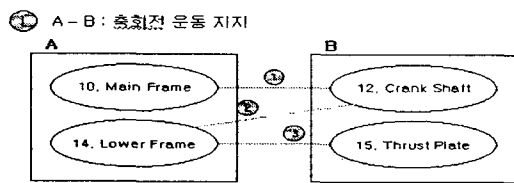


Fig. 16 Function Definition in Each Level (CRM)

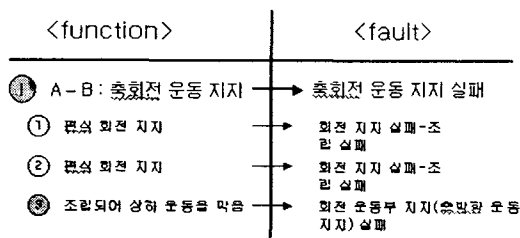


Fig. 17 Fault Definition (CRM)

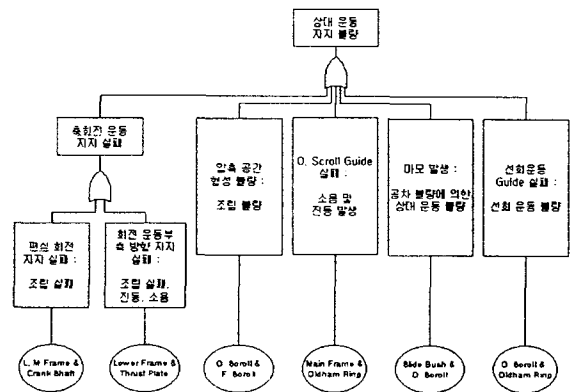
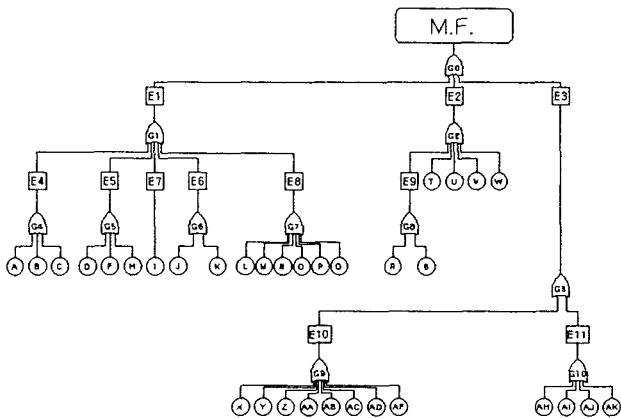


Fig. 19 Fault Tree (Configuration : CRM)

▪ Fault Tree 의 통합 구성

Scroll Compressor 의 경우 이런 방법으로 네 개의 Fault Tree(Energy, Material, CLA, CRM)를 작성하게 되며, 기능(Energy, Material)과 구성(CLA, CRM)의 두 가지 관점으로 크게 나뉘게 된다. 서로 다른 관점에 의해 전개된 Fault Tree 는 다른 Tree 와 동일한 entry 를 가지게 되는 경우가 있다. 이런 경우 같은 내용의 중복을 피하고, Tree 구조를 단순화 시키기 위한 통합과정이 필요하며 Fig. 20 은 통합된 결과를 나타낸다. 이것은 중복을 최소화 하여 Operation 과 Configuration 간 같은 항목이 나타나지 않도록 조정된 것이다. 또한, 각 entry 의 내용을 기호로 표시하였고, 각각의 기호에 해당하는 내용은 표로 정리하였다.

위와 같이 해서 Operation(Material flow) 관점과 Configuration(CRM)관점에 대한 Fault 정의까지가 가능하였다. 이제 이렇게 정의된 Fault 를 트리 구조로 나타내면 다음의 두 그림(각 관점별)과 같이 나타내어 진다.



Event(E)	Fault
M.F.	Scroll Compressor 작동 불량
E1	냉매 압축 불량
E2	상대 유출 방지 불량
E3	지지 및 외형 유지 실패
E4	냉매 유입 불량
E5	냉매 유출 불량
E6	전원 공급 불량
E7	기계 에너지 발생 불량
E8	냉매 압축 불량
E9	축 회전 유출 방지 실패
E10	지지 실패 또는 외형 유지 실패
E11	회전부 결속(조립) 실패
A	냉매 전달 불량 : 이물질 삽입에 의한 Leakage, Blockage
B	냉매 흡출 방향 조절 실패 : Blockage
C	냉매 밀봉 불량 : Leakage
D	냉매 통과 실패, 일정 압력 유지 실패 : Leakage, Blockage
F	압축 냉매 저장, 통과 실패 : Leakage
H	냉매 전달(유출) 불량 : 이물질 삽입에 의한 Blockage, Leakage
I	전원 입력 불량 : 불량 전원 또는 접속 불량에 의한
J	전자기장 발생 불량 : Stator 손상(코일 불량)
K	Rotor 회전 불량 : Rotor 자체 불량(타 모델 Rotor 도입 시 저전압 기동 불량)
L	역심 회전 불량 : 축 손상
M	C.S.와 O.S.사이의 운동 불량 : 마모에 의한 진동, 소음
N	Scroll에서의 냉매 압축 불량 : 선회 운동 불량
O	윤활유 공급 불량 : O, Propeller 손상
P	Rotor Assembly Balancing 불량 : 진동 및 소음
Q	압축 불량 : Blade 손상, Tip Seal 마모
R	역심 회전 지지 실패 : 조립 실패
S	회전 운동부 축 방향 지지 실패 : 조립 실패, 진동 및 소음
T	압축 공간 형성 불량 : 조립 불량
U	O, Scroll Guide 실패 : 소음 및 진동 발생
V	마모 발생 : 공차 불량에 의한 상대 운동 불량
W	선회 운동 Guide 실패 : 선회 운동 불량
X	Compressor 전체 지지 실패 : 조립 실패, 소음 및 진동
Y	Scroll부 고정 실패 : 소음 및 진동
Z	Sealing 실패 : 조립 불량에 의한
AA	부품간 조립 불량 : 진동 및 소음, 부품 고정 실패
AB	Compressor 외형 유지 실패 및 Leakage : 조립 실패
AC	부품간 조립 불량, 지지 실패 : 진동 및 소음
AD	조건부 Sealing 실패 : 조립 불량, 부품 고정
AF	Compressor 위치 고정 불량 : 조립 불량
AH	Crank Shaft 역심 보철 실패 : 진동 및 소음 발생
AI	부품간 조립 실패 : 진동 및 소음 발생
AJ	부품간 조립 실패 및 상하 운동 발생
AK	부품간 조립 실패 및 Crank Shaft 이물

Fig. 20 Fault Tree

4. 결론

Fault Tree Analysis는 제품 혹은 시스템의 신뢰성을 분석하는 방법으로 매우 유용하게 쓰이는 방법이며 Fault Tree는 고장을 일으키는 모든 하위 사건을 Top-Down 형태로 분석하여 고장의 원인과 영향을 체계적으로 분석하여 표현한 것이다. 이러한 FTA는 제품 설계 단계 전반에서 매우 유용하

게 사용되는 방법이지만 Fault Tree의 구성에는 체계적인 방법이 없어 실무자의 경험과 주관에 따라 구성 결과가 상이하다는 어려움이 있다. 본 논문에서는 제품의 고유 기능을 제품을 구성하는 부품 혹은 부품군의 단위 기능으로 분해하여 구성되는 기능전개를 통하여 Fault Tree를 구성하는 체계적인 방법을 제시하였다. 단위 기능에 대응되는 고장들을 이용하여 Fault Tree를 구성함으로써 Fault Tree의 구성이 객관화될 수 있으며 Bottom-Up 형태로 구성되어 고장들의 인과관계를 용이하게 분석할 수 있는 장점이 있다. 또한 신뢰성 분석에 있어서 각각의 Fault에 해당하는 세부 부품의 파악이 용이하므로 신뢰성 향상을 위한 설계 개선을 위한 활용이 가능하다.

향후의 연구에서는 Fault Tree 분석에서 제품의 신뢰성을 향상하기 위해서 필요한 단계로서, Fault Tree 분석에 의한 단위 고장 모드에 대한 부품의 설계 파라미터들의 특성치 분석을 통하여 각 고장 모드—설계 파라미터의 특성치가—해당 제품의 신뢰성에 미치는 영향을 수치적으로 분석하는 방법론이 연구되어야 한다. 그리고 분석된 제품이 상위 레벨의 단위 고장 모드가 되었을 때 다른 고장 모드와의 상호관계를 파악하여 시스템 전체에 대한 계층적 Fault Tree를 구성하는 방법론의 개발이 수행되어야 한다.

참고문헌

1. "Fault Tree Analysis Application Guide", Reliability Analysis Center, pp. 1-55, 1990.
2. 하성도, 이두영, "기계류 부품 신뢰성 모델링에 관한 연구", 2000년 춘계 학술대회 발표논문집, 한국신뢰성학회, pp. 223-230, 2000년 4월.
3. Contini, S., "A new hybrid method for fault tree analysis", Reliability Engineering and System Safety 49, pp.13-21, 1995.
4. 이언경, 박선주, 강달모, 하성도, "제품 기능 전개 방법에 관한 연구", 한국정밀공학회지 제 18권 4호, pp.55-63, 2001년 4월.
5. 하성도, 이언경, 박선주, 강달모, "기능 전개 결과를 이용한 Function Tree 구성에 관한 연구", 2000년도 추계 학술대회 논문집, 한국정밀공학회, pp.401-406, 2000년 10월.