

심층지식을 이용한 고장진단용 전문가시스템 개발에 관한 연구

하창승* · 류길수** · 정정수***

A Study on the Development of an Expert System using Deep Knowledge for Fault Diagnosis

Ha Chang - Seung, Rhyu Keel - Soo, Chung Chung - Su

Abstract

The purpose of this paper is to exploit the expert system using 'Reasoning From First Principle', and formalizes knowledge representation and reasoning strategy of its system. In the knowledge representation, knowledge is divided into parts of structure and behavior, respectively. In the reasoning strategy, reasoning is to introduce the principles of component actions as constraints, detect discrepancy between the observed values and the predicted ones using the simulation rules, and find out a trouble component using the inference rules in the system.

Through the method in the above, the trouble components in our system could have been correctly found. Also, the Most - Condition Search Technique(MCST) and the Path - Removal Technique (PRT) adopted were effective in diminishing reasoning time and searching path in the categories of failure.

1. 서 론

지금까지 시스템의 고장을 진단하기 위해 도입된 전문가시스템은 대부분 수학적인 정형화가 어려운 분야의 문제 해결을 위하여 해당분야 전문가의 경험적인 지식을 지식베이스에 저장한 후 이를 이용하는

* 한국해양대학교 전자계산소
** 한국해양대학교 제어계측공학과 조교수
*** 동명공업전문대학 전자계산과 조교수

지식기반형시스템으로 개발되어 전문가를 보조하여 왔다. 이와같은 전문가시스템은 전문가의 주관적인 견해가 많아 객관적인 판단을 하기가 어렵고, 대상영역이 복잡해질수록 지식의 양이 기하급수적으로 증가하며 새로운 시스템에 적용하기 위한 유연성이 부족해지는 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 기본 원리로 부터의 추론(Reasoning from first principle)¹⁾ 즉 심층지식(Deep knowledge)을 이용한 추론 등이 연구되어 왔다.

심층지식을 이용한 추론법으로는 증후에 근거한 진단법²⁾과 수학적 모델에 기반한 고장진단법³⁾ 등이 있다. 증후에 근거한 진단(Syndrome based diagnosis)법은 결정테이블에 나타난 증후색인 룰(Syndrome-indexed rule)로 센서에서 감지한 측정값과 미리 설정한 기준값을 비교하여 대상 프로세서계의 상태가 높은지, 정상인지, 낮은지를 정성적으로 인식하고 이 정성값에 따라 현 상황을 파악하는 방법이다. 수학적 모델에 기반한 진단법은 미리 알고 있는 모델변수와 측정값으로 부터 산출된 평가변수를 비교하여 이 변수들 간에 차이패턴(Discrepancy patterns)이 발생하면 이러한 차이로 부터 고장을 확인시켜 주는 방법을 이용하고있다.

이상의 방법들은 심층 지식을 이용하는 근본적인 목적 즉 대상계의 거동에 관한 이해라는 측면에서 고려해 보면 다음과 같은 점이 요구된다.

- ① 기준치등 미리 정해진 값과 측정값을 비교하는 것 만으로는 전 대상계의 인과관계를 이해하는 것이 어렵다. 따라서 대상계를 시뮬레이션하는 방법이 요구된다.
- ② 유사한 대상계에 대한 전문가시스템을 구성하는 경우 지식베이스 전체를 새롭게 구성해야 하므로 시스템의 범용성이 요구된다.

이런 점을 보완하기 위해서는 대상계를 구성하고 있는 구성요소들의 동작원리와 계의 구조로 부터 전체시스템의 거동(Behavior)을 시뮬레이션하고 시뮬레이션 결과와 실제 측정결과를 비교하여 고장요소를 발견하는 모델기반고장진단법^{4,5)}이 필요하게 된다.

이상의 관점으로 부터 본 논문에서는 모델기반고장진단법에 기반을 두고 각 상태의 변화를 정성적으로 추적해 가는 추론방법을 디지털 전자회로 분야에 적용시키고 추론과정에서 필수적으로 동반되는 탐색문제를 개선하는 새로운 고장진단법을 도입하기로 한다. 즉 대상계의 구성요소를 게이트단위에서 모듈단위까지로 계층화하고 거동부의 지식을 대상계의 동작특성에 따라 시뮬레이션 룰과 추론 룰로 다각 표현하여, 시뮬레이션 룰에서 결정한 예측값과 센서로 부터 검출된 측정값 사이에 차이값이 생기면 대상계가 정상적인 동작을 하지 않는 것으로 판단하여 추론 룰을 기동한다. 또한 기동된 추론 룰에 의해 고장 후보를 산출하고 고장후보들의 동작특성과 발견적 탐색법(Heuristics)을 이용하여 최종적으로 고장요소를 결정한다.

본 논문에서는 실제 응용을 쉽도록 하기 위하여 “C” 언어를 이용하여 상기 고장 진단방법이 가능한 회로고장진단시스템(CFDS : Circuit Fault Diagnosis System)을 개발하였다. 이 시스템으로 게이트단위의 전가산기와 모듈단위의 4비트 가산기 회로에 적용한 결과 구조부의 구조지식만을 교체함으로써 새로운 시스템이 쉽게 구성될 수 있었고 발견적 탐색법을 이용함으로써 보다더 빠르게 고장요소를 발견할 수 있었다.

2. 전자회로 고장진단에 관한 이론적 고찰

고장진단용 전문가시스템을 개발하기 위해서는 전문가의 지식을 어떻게 표현하고 표현된 지식을 사용하여 얼마나 신속하고 정확한 결론에 도달할 수 있느냐에 초점을 두어야 한다. 즉 고장진단에 사용될 지식표현법과 추론전략의 결정에 해당된다. 이상에 관하여 본 논문에서는 다음과 같은 몇가지 새로운 방법론을 도입한다.

(1) 지식표현에 있어서의 방법론 도입

- ① 구조부 지식을 표현할 새로운 형태의 규칙을 규정하고 구조부를 다시 동작특성부와 물리적 서술부로 다각표현하여 동작특성부에는 전자회로계의 부울함수를, 물리적 서술부에는 전자회로계의 구조를 이용한다.
- ② 게이트단위와 모듈단위의 처리를 동시에 지원하기 위한 방안을 고려한다.
- ③ 게이트나 모듈 간을 연결할때에 발생할 수 있는 경로상의 단락여부를 점검하기 위해 여분의 포트를 고려한다.

전자회로계를 지식으로 표현하기 위해 회로구성에 대한 정보표현의 중간단계로 두가지 의미망⁶⁾(Semantic network) 형태 즉 입력단, 출력단 모듈을 하나의 노드(Node)로 노드사이의 관계를 가지(Branch)로 표현하는 트리형(Tree-type)표현법과, 입력단, 출력단을 하나의 정점(Vertex)으로 하고 각 정점간의 관계를 간선(Edge)으로 표현하는 그래프형(Graph-type)표현법을 이용한다. 이러한 구분은 각 구성요소의 상호관련성과 의존도(Dependency)에 근거하여 표현한 것이다.

(2) 추론전략에 있어서의 방법론 도입

- ① 관측된 오류가 어느 구성요소에서 발생한 고장인지를 결정하기 위해 제약조건(Constraints)⁷⁾ 개념을 도입하여 물리적 서술부로부터 고장후보를 찾아내고 각 고장후보들의 동작특성부를 참조함으로써 고장요소를 발견하는 추론방법을 이용한다.
- ② 원인경로상호작용(Path of causal interaction)의 개념에 근거하여 구성요소간의 상호작용에 따라 추론이 이루어지게 하여 추론시간을 단축시킨다.

경험적인 지식을 이용한 고장진단에서는 대상에서 발생하는 증후를 지식베이스에 저장하여 놓고 이를 이용하여 고장요소를 결정한다. 그러나 심층지식을 이용한 고장 진단에서는 경험적인 지식을 사용하는 대신 대상체의 기본원리를 정형화하는 방법을 사용하여 고장을 진단한다. 따라서 본 논문에서는 기본원리를 정형화하는 방법으로 디지털전자회로의 거동속성인 부울함수를 제약조건으로 하여 심층추론이 수행되도록 한다

한편 전자회로에서는 어떠한 형태로든 서로 연결되어 있고 서로에게 영향을 미치므로 서로 인접하고 있는 요소상호간의 의존관계를 이해하고 이를 이용하는 것이 전자회로 고장후보 발생의 중요한 요인이 된다. 따라서 추론전략으로는 지식공간에 기술되어 있는 구조지식의 상호연결망인 의미망을 탐색함으로써

써 고장후보를 선정하고 고장후보들의 동작특성에 의해 최종고장후보를 결정하는 방법을 사용한다. 또한 일반적 탐색에서 발생하는 맹목적 탐색을 개선하여 고장가능성의 정도에 따라 탐색순위를 결정하는 확률적 가능성을 탐색의 방법론으로 이용하고, 고장의 원인을 제공한 고장후보들의 경로를 추적하여 최종고장요소를 결정하는 원인경로 상호작용을 추가함으로써 보다더 신속한 추론이 가능하도록 한다.

3. 고장진단을 위한 지식표현과 추론전략

3.1 지식표현법

대상계의 구조에 대한 정보를 지식으로서 지식베이스에 나타내기 위해서는 구성요소의 정의와 구성요소의 동작특성, 구성요소간의 연결 관계를 서술하여야 한다.

본 논문에서는 구성요소를 게이트와 모듈로, 구성요소의 동작특성은 게이트나 모듈의 동작원리에 관한 규칙을 기술한 것으로, 구성요소간의 관계는 게이트나 모듈의 상호 연결관계를 기술한 것으로 정의한다.

1) 동작특성의 지식표현법

구성요소로 정의한 기본 게이트 및 모듈의 동작특성은 다음 예와 같은 프로덕션룰로 표현된다.

요소명	논리 함수	대수식	프로덕션룰형식
NAND	$F(A,B)=A \cdot B$	$X=(A \cdot B + 1)\%2$	IF(ACT_QUALS.EQ. NAND) ----> (ACCEPT A B) (MAKE (A × B + 1)% 2)

2) 구성요소간의 연결관계의 지식표현법

전자회로계의 지식표현 방법론으로 도입한 트리형과 그래프형의 의미망을 이용하여 구성요소의 연결관계의 표현을 프레임으로 기술한다. 일반적으로 프레임은 프레임명(Frame - name), 슬롯(Slot), 값

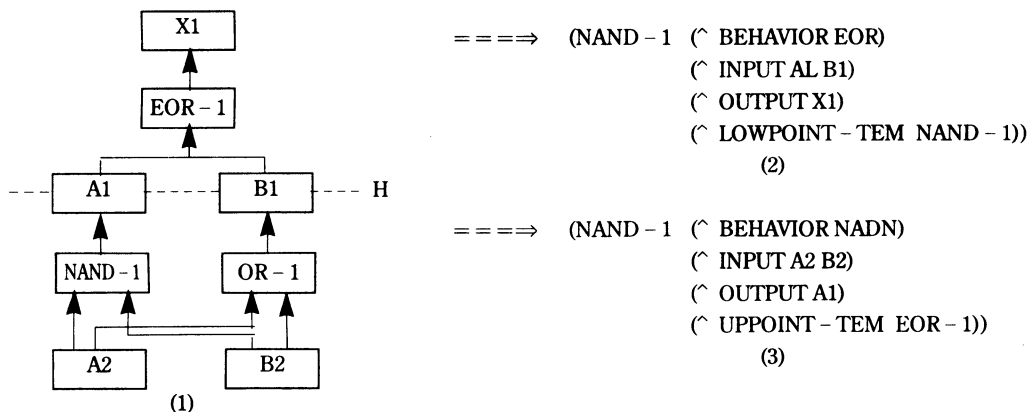


Fig. 1 Expression for Converting Tree - type and Graph - type to Frame

ue)의 순서로 나열되며, 본 논문에서는 그림 1의 (2), (3)과 같은 형식으로 구성한다.

3.2 추론 전략

전자회로계의 고장진단에 있어서 문제해결의 응답속도와 가장 관련이 있는 것은 추론전략이다. 본 논문에서 사용한 추론법은 대상계의 구조와 구성요소의 거동에 기반을 두고 대상의 정성적 성질을 이용하여 고장요소를 발견하며, 구성요소의 거동으로 기본 동작원리 즉 앞절에서 논한 구성요소의 동작특성을 이용하고 있다. 이러한 기본 동작원리를 제약조건이라 부르며 이 제약조건을 이용하여 고장후보들을 생성한다. 또한 추론에 동반되는 탐색방법으로 두가지 발견적 탐색법 즉 최대조건탐색기법(Most-Condition Search Technique)과 경로제거기법(Path-Removal Technique)을 도입하여 탐색경로를 제한하고 있다.

추론과정을 예시한 그림 2에서 예측값과 측정값사이에서 차이값이 발생한 G단에서 추론 물이 기동되어 1차적 고장후보로 ADD-1, MULT-1, MULT-2모듈 중에 어느하나가 고장이라고 가정하여 고장후보 리스트에 등록한다. 이경우 최대조건탐색기법에 의해 하부경로가 가장 많은 MULT-1이하를 우선적으로 점검하게 된다. 만약 W포트를 출력단으로 하는 새로운 종속망에서 차이값이 검출되면, ADD-1과 MULT-2 모듈의 점검은 탐색대상에서 제외되며, 이를 경로제거기법이라 한다. 또한 추론은 W포트를 새로운 종속망으로 하여 상기과정을 반복한다. 그러나 W포트에서 차이값이 검출되지 않았다면 MULT-1이하의 종속망을 정상적 동작부로 판단하여 백트래킹을 행하고 탐색제어를 초기위치 G로 되돌리며 다음 순위노드에 대한 탐색을 계속한다.

이와같은 방법으로 고장후보의 수를 줄여가는 작업을 반복하여 최종적으로 고장요소를 결정한다.

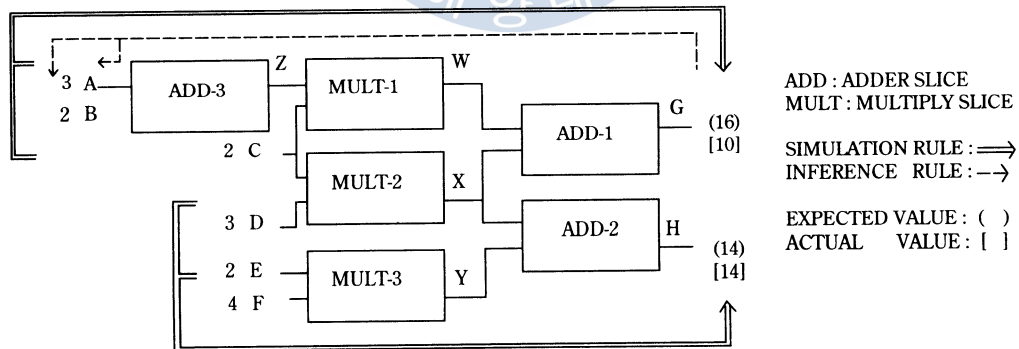


Fig. 2 Inference Process for Trouble Detection

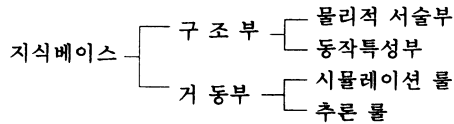
4. 심층지식을 이용한 전문가시스템의 구성

4.1 구조와 거동에 기반한 시스템

전문가의 경험적 지식을 사용하여 추론하는 일반적 전문가시스템은 전술한 바와 같이 객관성이 부족하고 대상이 바뀌면 지식베이스 전체를 새롭게 작성해야 하는 등의 문제점을 가지고 있다. 이러한 문제점

을 해결하기 위하여 본 논문에서는 구조와 거동에 기반한 시스템을 지식베이스와 추론엔진으로 구성했고, 시스템은 크게 3개의 영역으로 다음과 같이 나뉘어진다.

첫째 : 지식베이스 부분으로 대상체의 구조지식과 거동지식을 저장하는 영역이며 다음과 같이 분리된다.



둘째 : 구조부와 거동부의 지식을 이용하여 고장후보를 발견하는 추론기구

세째 : 추론부와 지식부의 패턴매칭이 이루어지는 작업영역

4.1.1 구조부의 구성

구조부는 요소의 상호연결에 대한 정보를 저장해 놓은 곳이다. 즉 회로도면에서 주석을 제거하고 남은 정보와 같다. 이러한 정보가 외부의 데이터베이스로 주어지면 데이터베이스를 지식베이스에 저장한다. 이렇게 형성된 구조부의 내용을 룰형식의 동작특성과 프레임형식의 물리적 서술의 두가지로 분류하여 서로 다른 구조체형식을 취하게 하고 있다.

1) 동작 특성부

구성요소인 모듈이나 게이트가 가지는 기본 동작원리를 기술하는 부분인 동작 특성부는 대상체의 동작특성을 주어진 상황에 적절히 대응시키기 위해 인과관계를 명시적으로 서술하기가 쉽고 정형화가 용이한 IF - THEN형식 즉 룰형식으로 구성되어 있다. 다음 예는 동작 특성부의 기술에 관하여 나타내고 있다.

```

IF (*BEHA[VAR] == SDB[J].ATTR)
  {EOR(J, A1, B1)} ;
IF (*BEHA[VAR] == SDB[J].ATTR)
  {NAND(J, A1, B1)} ;
IF (*BEHA[VAR] == SDB[J].ATTR)
  {AND(J, A1, B1)} ;
  
```

2) 물리적 서술부

물리적 서술은 요소상호간의 위치적 관계와 요소의 구성체계를 나타낸 것으로서 물리적 서술부의 가장 기본적인 단계는 게이트 단위에서는 게이트, 터미날, 패스이고 모듈단위에서는 모듈, 포트, 패스라고 할 수 있다. 다음은 반가산기의 물리적 서술부를 예시한 것이다.

```

(HALF - ADD2 (^ BEHAVIOR ADD)
 (^ INPUT TEM A1 B1)
  
```


(\wedge OUTPUT - TEM C11 S11)

(\wedge UPPOINT - TEM ADD - 1)

(\wedge LOWPOINT - TEM AND - GATE1 XOR - GATE1))

4.1.2 거동부의 구성

거동부는 대상계의 거동속성이 룰형태로 기술되어 있으며, 추론기구가 고장요소를 발견할때 이용된다. 종래의 시스템에서는 거동부를 기술하기 위해 Petri-net나 Unrestricted chunk의 방법⁷⁾이 사용되어 왔으나 이런 방법들은 간단한 구조의 거동부를 기술하기에는 적절한 방법이었으나 기기 구성이 복잡해 질수록 표현이 어려워지기 때문에 제약조건에 근거한 추론을 위해서는 아래와 같이 거동부를 두 가지 룰형태로 표현하는 것이 유용하다.

- 시뮬레이션 룰 : 입력단 정보를 이용하여 출력단 정보를 얻는 순방향탐색 룰
- 추론 룰 : 출력단 정보를 이용하여 입력단 정보를 얻는 역방향탐색 룰

예를 들어 가산기의 거동부는 입력값 Input - 1, Input - 2와 출력값 Sum - 1이 터미널상에서 다음과 같이 논리적 관계로 표현되어 질 수 있다.

TO GET SUM - 1 FROM (input - 1 input - 2) DO (+input - 1 input - 2) (1)

TO GET INPUT - 1 FROM (sum - 1 input - 2) DO (-sum - 1 input - 2) (2)

TO GET INPUT - 2 FROM (sum - 1 input - 1) DO (-sum - 1 input - 1) (3)

이때 추론은 시뮬레이션 룰을 이용하여 차이값을 검출하고, 차이값이 발생되면 추론 룰을 이용하여 고장후보를 결정하며 다시 거동부에 기술된 동작과정을 이용하여 고장후보에 관련된 추론 룰을 반복적으로 이용함으로써 최종고장후보를 결정하게 된다.

4.2 고장요소 발견을 위한 구동알고리즘

Step 1 : Discrepancies collection step

- 1.1 : 외부 데이터베이스를 내부 지식베이스로 저장시킨다.
- 1.2 : 대상망의 입력단에 입력값을 받아들인다.
- 1.3 : 시뮬레이션 룰에 의해 예측값을 구한다.
- 1.4 : 측정값과 예측값을 비교한다.
- 1.5 : 두값사이의 차이를 검출한다.

Step 2 : Inference process step

- 2.1 : 발견된 차이값의 원인을 탐색하기 위해 추론 룰을 구동한다.
 - ① 불일치가 발견된 포트에 영향을 미친 모든 모듈을 탐색한다.
 - ② 예상되는 모든 모듈을 고장후보 리스트에 등록한다.
 - ③ 만약 등록되는 고장후보가 하나이면 Step 3.3으로 간다.

2.2 : 등록된 고장후보들을 종속망의 하부 노드수에 따라 가중치를 부여하고 탐색순위를 결정한다.

Step 3 : Constraints suspension step

3.1 : 거동부에 표현된 의미망에 제약조건을 부여하여 값을 전파시킨다.

3.2 : 탐색순위가 가장 높은 종속망의 최상위 요소에 대한 논리적 오류를 검색한다.

IF (.TRUE.) THEN

① 탐색대상 종속망의 하위 요소에 대한 검색을 생략한다.

② 다음 탐색 순위의 종속망을 탐색대상으로 하여 Step 3.1로 되돌아 간다.

ELSE

① 다음 순위의 탐색대상은 정상적으로 동작한다고 가정하여 탐색대상에서 제외시키며, 검색중인 요소에서 차이값이 발견된 것으로 하고 Step 2.1로 되돌아 간다.

END IF

3.3 : 최종 고장요소를 결정하고, 저장한다.

5. 실행 예

전가산기를 대상으로한 추론과정의 예

그림3와 같은 전가산기를 대상으로 하여 입력단 및 출력단의 터미널 이름과 측정값을 입력하였을 때 표 1과 같은 결과를 얻었다. 실행은 각 입력단 {A1,B1,C0}의 초기값을 {0,1,1}로 부여하고 출력단 {S1, C1}의 값이 {1,1}로 측정되었을 경우, 시스템의 {X1} 값의 요구에 대해 사용자가 {1}을 응답한 경우로 시스템은 EOR-1이 고장요소임을 지적했다. 실행은 초기값을 {1,0,0}으로 부여하고 출력단의 값이 {0,1}로 측정되었을 경우, 시스템의 {X1,Y1} 값의 요구에 대해 {0,0}을 응답한 경우 시스템은 EOR-1과 NAND-1이 고

Table 1. Process of inference in full adder

종 류	state \ num		①		②		③		④		⑤	
	A1	B1	0	1	0	1	0	1	0	1	0	1
초 기 상 태 입 력 값	A1		0		1		1		0		0	
	B1		1		0		0		1		0	
	CO		1		0		0		0		1	
	S1		1		0		1		1		1	
	C1		1		1		1		1		1	
시뮬레 이션중 입력값	포 트 명	측 정 값	X1	1	X1	0	Y1	0	Y1	1	Y1	1
					Y1	0	X1	1	Z1	0	Z1	1
고 장 요 소			EOR-2		EOR-1 NAND-1		NAND-1		NAND-2		NAND-3	

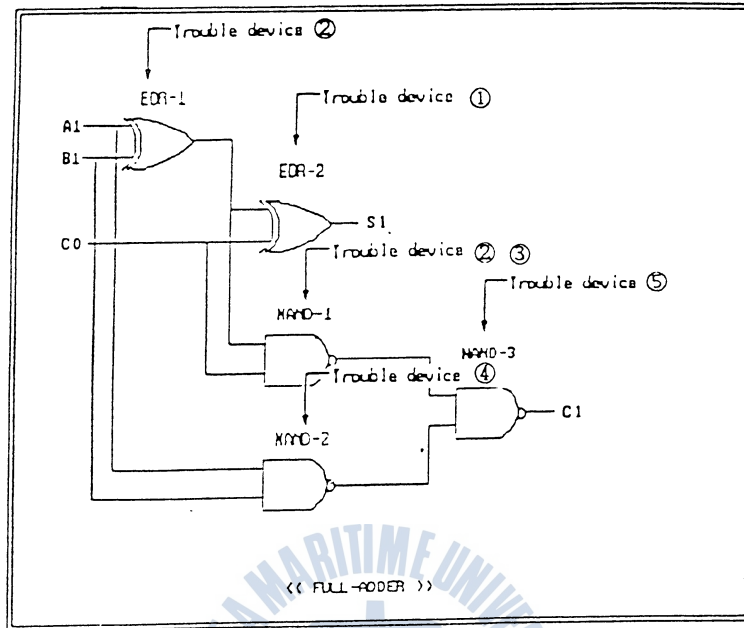


Fig. 3 Case of trouble in full adder

장요소임을 지적했다. 유사하게 실행③에 대해서는 NAND-1이, 실행④에 대해서는 NAND-2가, 실행⑤에 대해서는 NAND-3이 고장요소임을 지적했다.

6. 결 론

본 논문에서는 구조와 거동에 기반한 시스템 기법을 도입하고 이를 실현하기 위해 프로토타입(Prototype) 회로고장진단시스템을 개발하였다. 대상계를 구조부와 거동부로 분리하여 이용함으로써 모듈성이 높아졌으며, 제약조건을 도입하여 심층 추론이 가능하게 되었고, 따라서 다음과 같은 장점을 가지게 되었다.

- (1) 기본 원리로부터의 추론으로 대상계의 정확한 고장진단 및 독립성을 유지 하게 되었다.
- (2) 적용되는 범위가 결정되면 유틸리티를 만들고 유지하기가 쉬웠다.
- (3) 새롭게 발생한 증상에도 대처할 처리능력을 가지게 되었다.
- (4) 새로운 시스템의 개발에는 지식부 혹은 거동부만을 교체하면 가능하기 때문에 개발기간을 단축시키게 되었다.

또한 본 논문에서는 'C' 언어를 이용하여 시스템을 개발하였으므로 외부기구나 외부 데이터베이스와의 인터페이스를 용이하게 하였고 처리속도를 증가시켰으며 그래픽기능등의 추가가 용이하였다.

참 고 문 헌

- 1) David Klein and Tim Finin, "What's in a deep model?", IJCAI, 1987.
- 2) Y. Ishida, "An application of qualitative reasoning to process diagnosis", IEEE, 1988.
- 3) Miron Abramovici and Melvin A. Breuer, "Fault Diagnosis in Synchronous Sequential Circuit Based on an Effect - Cause Analysis", IEEE Transactions on Computers. Vol. C - 31, No.12, 1982.
- 4) 류길수, "열교환기 온도제어계통에 있어서의 고장진단에 관한 연구", 1990.
- 5) 류길수, "故障診斷システムにおける知識獲得 深推論 關 研究", 學位論文, 1989.
- 6) 이상윤, 김재희, "의미네트워크 변환에 의한 생성시스템의 추론 속도향상", 정보과학회논문지 vol. 17, p. 74 p. 83, 1990.
- 7) Randall Davis, "Diagnostic reasoning based on structure and behavior", Artificial Intelligence, 1983.
- 8) Hector Geffner and Judea Pearl, "An improved constraint propagation algorithm for diagnosis", IJCAI, 1987.

