Journal of the Korean Institute
of Industrial Engineers
Vol.22, No.3, September, 1996

진단 수행도에 대한 지식형태의 효용에 관한 연구

The Effects of Types of Knowledge on the Performance of Fault Diagnosis

함동한*, 윤완철*

Dong Han Ham* and Wan Chul Yoon*

Abstract

With respect to the effects of types of knowledge on human diagnostic performance, the results of several experiments claimed that training with procedural knowledge is more effective than training with principle knowledge. However, more useful results would be attained by investigating when and how the principles of system dynamics is valuable for diagnosis. Accordingly, we conducted an experiment to reevaluate the value of principle knowledge in two problem situations. A simulator system, named DLD, to diagnose an electronic device was created. It is a context-free digital logic circuit which includes forty-one gates of three basic types. The experiment investigated the effects of principle knowledge over common procedural knowledge. The experimental results showed that the effects of principle knowledge is dependent on the complexity of diagnostic situations. This adds up an experimental evidence against the presumed ineffectiveness of principle knowledge and forward reasoning in fault diagnosis. The results also suggest the source of the usefulness of principle knowledge.

I. 서론

인간과 기계의 통합된 시스템을 대상으로 하는 인간-기계 시스템(human-machine systems)의 연구는 인간의 능력과 한계를 연구하여 이를 바탕으로 인간의 수행도를 향상시

* 한국과학기술원 산업공학과

켜 줄 수 있는 시스템 개발에 촛점을 맞추어 가고 있다 [12]. 정보기술이 발전하면서 개발되는 시스템들은 점점 대규모화, 자동화, 지능화되어 가고, 시스템내의 인간은 감시, 제어, 진단등 고도의 문제해결을 하는 의사결정자로 바뀌어가게 된다 [10, 12]. 육체적 작업과 자동화가 용이한 정신적 작업은 컴퓨터가 하게 되고, 결국 인간은 컴퓨터가 할 수 없는 고도의 정신적 작업을 수행하게 된다. 이런 점에서 현대의 시스템에서 인간이 수행하게 되는 작업과정에서 나타나는 인간의 인지적 능력과 한계를 연구하는 것은 중요한 의미를 갖는다.

고장진단은 현대의 시스템에서 점점 중요해지는 작업이면서 인간의 의사결정 문제중에서 가장 어려운 분야임이 여러 연구결과에 의해 알려져 있다 [8, 12, 17]. 이 때문에 인지공학 및 인공지능분야에서 많은 고장진단 연구가 수행되어 왔다. 인공지능분야에서는 컴퓨터에 의한 자동진단 시스템 개발에 연구를 집중해왔으나 여러 한계를 드러내고 있다. 이는 고장진단 과정과 인간의 인지 과정을 너무 단순하게 간주한 오류에 기인한다. 고장진단은 컴퓨터에 의한 완전 자동화가 어려우며 인간의 여러 인지적 능력을 요구하는 분야이다[19]. 그러므로 고장진단 수행도 향상을 위해서는 고장진단에서의 인간의 인지적 특성을 바탕으로 한 적합한 훈련시스템, 지원시스템 및 인터페이스 설계를 해야한다 [17, 18, 19].

한편, 진단자가 훈련과정에서 배우게 되는 지식은 고장진단 수행도에 중요한 영향을 미친다. 진단자가 훈련과정에서 배우게 되는 지식은 진단할 때 이용하는 전략을 변화시킬 수 있으며, 이에 따른 정보지원 시스템의 설계요건을 다르게 할 수 있다. 그런데 진단자가 배우는 지식은 두 가지 형태 (절차적 지식과 원리적 지식)로 구분할 수 있으며, 이들이 제각기 진단 수행도에 어떤 영향을 미치는가를 연구할 필요성이 대두된다.

본 논문에서는 위 문제에 관한 기존의 연구 결과들을 고찰한 후 방법론적인 문제점들을 지적한다. 제시된 문제점을 기반으로 새로운 가설을 제안하고, 이 가설을 검증하기 위한 실험을 설명하고 있다. 마지막으로, 실험결과에 근거해서 지식의 형태와 고장진단 수행도의 관계에 대한 재조명 및 그 의미를 설명한다.

II. 연구의 배경 및 목적

2-1. 지식의 형태

인지공학 및 관련분야에서는 여러 기준에 의해 지식을 구분하고 있으나 [11, 14, 17], 진단에서 의미있는 한 구분은 원리적 지식(principle knowledge)과 절차적 지식(procedural knowledge)이다 [11].

원리적 지식은 시스템의 설계원리 및 인과관계(causalities)에 기반한 지식이다 [2, 3, 5]. 즉, 시스템 목적을 위해 구현된 구조(structure)와 기능(function)에 관한 지식이다. 가령, 원자력발전소에서 구성요소들 (e.g. valve, pump, boiler)의 작동원리 및 이들간의 물리적 내지는 기능적 상호관계가 원리적 지식에 해당된다. 원리적 지식의 이용은 deep reasoning과 연관된다.

절차적 지식은 행위절차를 규정함으로써 많은 주의력과 인지과정을 거치지 않고도 요

구되는 행위를 할 수 있도록 해주는 지식이다 [9, 13]. 절차적 지식의 예로서 어떤 도구의 이용절차, 특수한 고장형태에 대한 진단과정의 행위규정등을 들 수 있다. 가령, "공정제어에서 온수밸브는 열려있으나, 온도의 변화가 없으면 밸브를 닫고 파이프 상태를 점검하라. 이상이 없으면 냉수밸브를 열고 온도의 변화가 있는지 관측해라." 와 같은 규칙이 절차적 지식에 해당된다. 절차적 지식은 일반적으로 if_then 형식으로 표현되며 shallow reasoning과 연관된다.

절차적 지식에 비해 원리적 지식은 진단자에게 상대적으로 큰 인지적 부담을 줄 수 있다. 절차적 지식은 진단자가 다음에 무엇을 해야하는지 혹은 취득한 정보를 어떻게 이용해야 하는지를 규정해주기 때문에 적은 인지과정을 거치면서 작은 인지적 부담으로 진단을 수행할 수 있다. 반면에 원리적 지식을 이용할 경우 정상적인 작동원리를 이용해 고장상황을 파악하고 시스템 상태를 예측 및 가정하면서 가설설정 후 테스트를 하는 등 여러 추론과 문제해결과정을 거치게 된다. 이와 같은 인지적 정보처리활동은 주의력과 단기기억 장소의 한계를 지니고 있는 진단자에게 많은 인지적 부담을 주게된다.

2-2. 고장의 형태

고장은 일상적 고장(routine fault, or familiar fault)과 불가측 고장(novel fault, or unfamiliar fault)으로 구분할 수 있다[9, 13, 19]. 일상적 고장은 발생 빈도가 상대적으로 많으며 진단자가 훈련 및 진단경험등에 의해서 접해봄으로써 발생 가능성을 예측할 수 있는 고장이다. 불가측 고장은 시스템 설계과정에서 예측하지 못해 진단자가 처음으로 접해보는 고장으로 발생빈도는 작다. 그러나 시스템이 복잡해지면서 발생가능한 고장을 모두 예측한다는 것이 불가능하게 되었고, 시스템 안전 및 성능에 중대한 영향을 미치는 것이 불가측 고장이라는 점에서 불가측 고장진단은 중요한 의미를 지닌다.

두 고장의 중요한 차이점은 일상적 고장은 예측이 가능하여 이에 대비한 진단절차를 설계하는 것이 가능한 반면, 불가측 고장은 그렇지 못하다는 점이다. 이 차이점은 진단자로 하여금 일상적 고장진단에 비해 불가측 고장진단에서 상대적으로 큰 인지적 부담을 주게 되는 결과를 초래한다. 이는 진단자가 느끼는 인지적 복잡도가 불가측 고장에서 더 큼을 의미한다. 앞서 언급했듯이 일상적 고장진단의 경우 절차적 지식의 이용이 가능하기 때문에 진단자는 스스로 모든 인지적 정보처리활동을 할 필요없이 규정된 절차를 따르기만 하면 된다. 반면에, 진단자는 불가측 고장진단을 하기위해 스스로 고장난 시스템의 상태를 해석한 후 진단을 위해 필요한 가설을 설정하고 정보를 수집하며 수집된 정보를 이용해 가설을 검증 내지는 재설정을 하는 등 반복적으로 수많은 추론과 문제해결과정을 수행해야 한다.

2-3. 기존의 연구 결과 및 문제점

본 논문의 주제인 지식의 형태와 고장진단 수행도의 관계에 대해서 여러 연구들이 수행되어왔다. 그 중에서 1985년에 Morris에 의해 수행된 연구는 주목할 만하다[9]. 이 연구의 결과는 현재 많은 진단연구에 실험적 증거로 이용되고 있으며 실제적인 응용연구에도 적

지 않은 영향을 미치고 있다.

Morris는 자신의 연구에서 PLANT라는 process plant 실험용 시뮬레이터를 만들고, 피실험자에게 생산량을 최대로 하기 위한 공정제어를 하면서 고장이 발생하면 진단을 수행하여 공정을 안정시키도록 하였다. 이 실험에서 이용 가능한 지식은 1)시뮬레이터에 관한 기본적 지식, 2)일상적 고장에 대한 진단절차, 3) PLANT설계에 관련된 원리적 지식의 3가지였다. 훈련과정에서 피실험자에게 제공한 지식에 의해 피실험자들을 4그룹으로 나누었다. A그룹은 1)의 지식을, B그룹은 1)과 2)의 지식을, C그룹은 1)과 3)의 지식을, D그룹은 모든지식을 습득하였다. 훈련이 끝난 뒤에 피실험자들은 4회에 걸쳐서 고장진단을 수행했다. 4회 중에서 일상적 고장이 2회, 불가측 고장이 2회로 설정되었다. 실험결과는 1) 일상적 고장의 진단에서 B그룹과 D그룹이 A그룹과 C그룹보다 우수했다. 2) 불가측 고장의 진단에서 B그룹이 C그룹및 D그룹과 비슷한 수행도를 보였다. 3) B그룹과 D그룹이 A그룹과 C그룹에 비해서 전체 수행도에서 우수했다. 4) B그룹과 D그룹은 전체 수행도에서 별로 차이가 없었다. 5) C그룹이 A그룹보다 전체수행도에서 우수했다.

Morris는 실험결과를 바탕으로 다음과 같은 결론을 내렸다. 첫째, 원리적 지식과 절차적 지식 모두 진단수행도를 향상시키는 데 효과적이다. 둘째, 원리적 지식은 불가측 고장을 진단하는 데 별로 효과적이지 못하다. 셋째, 절차적 지식이 원리적 지식보다 진단수행도를 향상시키는 데 더욱 더 효과적이다. 즉, Morris는 지식의 형태와 고장진단 수행도의 관계에 대해 절차적 지식이 더 효과적이라고 결론을 내렸다. 그리고 자신의 연구결과를 뒷받침해 줄 수 있는 추가적 증거로 다른 기존의 연구결과들[6, 15, 16]도 함께 예로 들었다. Morris 연구 이후 Duncan의 연구[4]도 동일한 결론을 내리고 있다.

그러나 절차적 지식만을 사용하는 것이 모든 고장진단에서 효율적일 수는 없다. 특히 규정된 진단절차를 전혀 갖고 있지 않은 불가측 고장을 진단할 때 원리적 지식의 유용성이 예상되는 바, 원리적 지식이 어떠한 조건하에서 어떠한 역할을 하는가 하는 것을 밝히는 것이 중요하다. 위와 같은 생각을 바탕으로 기존의 연구들을 재조사한 결과 실험방법에서 몇 가지 문제점이 발견되었다.

우선, 피실험자에게 제공된 원리적 지식이 진단에는 유용하지 못한 성격의 지식이었다. 제공된 원리적 지식이 시스템의 구조 및 기능에 관련한 지식이였지만, 수식중심이고 진단과는 별로 관련이 없어서 진단자가 이용하기에는 부적합하였다. 또, 실험에서 이용되었던 시뮬레이터가 일련의 절차적 지식을 이용해 거의 완벽하게 제어되고 고장이 진단될 수 있었으며, 설정된 불가측 고장의 복잡도도 너무 낮았다. 그래서 불가측 고장진단에서 진단자가 원리적 지식을 이용하는 대신 인지적 부담이 작은 절차적 지식을 이용해 진단을 수행했다. 이런 이유로 원리적 지식의 유용함이 제대로 평가되지 못하였던 것으로 판단된다.

2-4. 연구의 목적

위에서 언급한 기존 연구들의 방법론적인 문제점으로부터 원리적 지식이 진단수행도에 대해서 가지는 가치를 다시 한번 연구해야

할 필요성이 제기된다. 즉, 고장진단의 수행도를 향상 시키기 위해서 진단자가 갖게 되는 지식의 형태와 그 효과에 대하여 새로운 가설을 증명하는 것이 본 연구의 목적이다. 구체적으로, 본 연구는 2가지 가설을 밝히고자 한다. 1) 고장진단에서 원리적 지식의 효과가 존재한다. 2) 원리적 지식의 효과는 고장의 복잡도에 의존한다. 이 두가지의 가설을 입증하기 위해서 논리회로에 기반한 시뮬레이터를 이용해 실험을 수행했다.

III. 실험 및 결과

3-1. 실험 시뮬레이터

기존 연구들의 결점을 보완한 실험을 위해서는 몇가지 특성을 만족하는 시뮬레이터의 개발이 요구되며 그 특성은 다음과 같다. 1) 'context-free'해서 여러 시스템에 공통적으로 존재하는 구조를 반영할 것. 2) 인지적 복잡도가 높은 불가측 고장의 설정이 가능할 것. 3) 모든 고장의 진단이 절차적 지식만으로는 해결할 수 없어서 시스템의 원리적 지식이 요구되는 경우가 있을 것. 4) 피실험자가 시뮬레이터와 상호작용하며 진단을 수행할 것.

실험을 위해 DLD (Digital Logic Diagnosis)라는 시뮬레이터가 개발되었다. DLD에는 전자논리회로의 기본적인 6개의 gate중에서 AND, OR, X-NOR의 3가지 gate만을 사용한 총 41개의 gate로 구성된 회로가 있다. 그림 1은 DLD의 주 화면 및 회로의 구조를 보여주고 있다. 회로는 4개의 입력 포인트 (회로의 왼쪽 부분)와 4개의 출력 포인트(회로의 오른쪽 부분)를 가지고 있다. 회로는 정상상태에서 정보가 입력된대로 출력되도록 설계되어 있다. 예를 들면, '0-1-1-1'이 입력되면 '0-1-1-1'이 그대로 출력되야 한다. 그러나 회로를 구성하는 gate가 고장이 날 경우 입력과 출력이 다르게 된다. 그림 1에서 세번째 출력이 세번째 입력과 다르므로, 이 상태는 회로를 구성하고 있는 어떤 gate에서 고장이 났음을 알려준다. 즉, DLD에서의 고장은 회로를 구성하고 있는 gate의 고장을 의미한다. 본 연구에서는 한 개의 gate 고장만 다루는 single-fault 상태만 다루도록 한다.

Gate의 고장은 그 gate에 연결된 두개의 입력 line중에서 어느 하나가 절단되어 그 gate가 원래의 기능을 할 수 없는 고장을 의미한다. 절단된 line으로는 항상 '0'가 흐르게 된다. 예를 들면, 어떤 AND gate에서 고장이 발생했으면 '1-1'이 입력되었더라도 '1'이 아닌 '0'를 출력하게 된다. 그림 2는 각 gate의 정상 및 고장상태에서의 입/출력의 관계를 나타낸다. 그런데 DLD에서 일어나는 고장은 피실험자가 어느 gate에서 발생할 것인가를 전혀 예측을 할 수 없으므로 불가측 고장이 된다.

피실험자는 입력과 다른 출력의 형태를 보고 고장난 gate를 진단해야 되는데, 몇 가지 추가적으로 유용한 정보를 이용할 수 있다. 첫째, 피실험자는 시뮬레이터에 설정된 10개 test-point의 정보를 이용할 수 있다. 그림 1에서 오른쪽 상단에 작은 box를 가지고 있는 6번 gate나 15번 gate등이 test-point이다. 피실험자가 마우스로 test-point를 클릭하면 그 gate의 출력이 오른쪽 상단의 작은 box에 표시된다. 단, 동시에 두 개 이상의 test-point 정보를 이용할 수 없도록 설계되어서 한 개의 test-point를 이용하면 이전에 있던 test-point

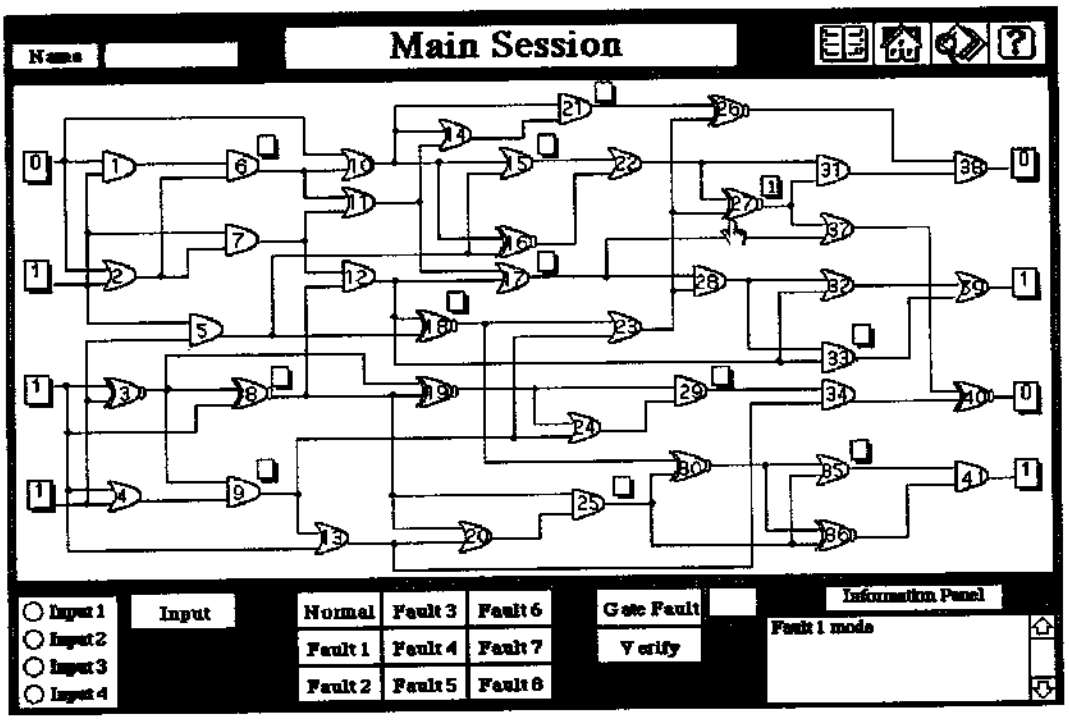

그림 1. DLD의 주 화면 및 회로의 구조

	AND		OR		X-NOR	
입력	정상상태	고장상태	정상상태	고장상태	정상상태	고장상태
0-0	0	0	0	0	1	1
1-0	0	0	1	0	0	1
0-1	0	0	1	0	0	1
1-1	1	0	1	1	1	0

그림 2. 각 gate의 정상 및 고장상태에서의 입/출력 관계

의 정보는 없어지게 된다. 두번째, 피실험자는 고장난 gate를 진단하기 위해 입력을 변경해서 고장난 상태 하에서 새로운 출력을 얻을 수도 있다. 이들 기능은 시뮬레이터와 상호작용하면서 진단하는 성격을 반영한 것이다. 결국, 피실험자는 1) 입력과 다른 출력의 형태, 2) test-point의 정보, 3) 입력변경에 따른 새로운 출력을 이용해서 고장난 gate를 찾는다.

DLD에서는 두가지 형태의 지식이 모두 이용된다. 첫째, 절차적 지식으로 DLD에서는 세가지 종류의 것을 생각할 수 있는데, 1) 진단절차의 이용에 관한 지식, 2) test-point이용에 관한 지식, 3) 새로운 입력변경에 관한 지식으로 이루어지게 된다. 이 지식들은 예비실험 및 여러 고찰을 통해 이루어 진 것으로써 절차적 지식의 의미를 충분히 반영한 것이라 할 수 있다. 그림 3은 각 종류별 절차적 지식의 예를 보여주고 있다. 두번째로, 원리적 지식으로 DLD의 회로는 논리회로 이론으로부터 설명될 수 있는 기본적인 간략화 법칙(simplifying rules)을 이용해서 설계가 되

었다. 간략화 법칙이란 여러개의 gate로 이루어진 sub-circuit이 하나의 gate로 간략화될 수 있는 법칙을 의미한다. DLD의 회로는 입력과 출력이 동일하도록 7개의 간략화 법칙을 적절히 이용했다. 간략화 법칙은 DLD의 회로설계의 기본이 되는 원리이므로 이 법칙에 관한 지식이 바로 원리적 지식이다. 그림 4는 DLD의 회로가 이용한 7개의 간략화 법칙 및 이 법칙들을 적용한 sub-circuit들을 보여주고 있다.

3-2. 실험계획

(1) 가설

(가) 피실험자를 두 그룹(principle-group, procedure-group)으로 나누고 principle-group에는 절차적 지식과 원리적 지식을 훈련시키며 procedure-group에는 절차적 지식을 훈련시켰을 때 principle-group의 수행도가 procedure-group의 수행도보다 더 우수하다. 이는 원리적 지식의 효과가 존재함을 의미한다.

(나) 원리적 지식의 효과는 고장의 복잡도에 의존해 나타난다. Complex-type 문제 (뒤에 설명)에서 원리적 지식의 효과가 큰 반면

1. 진단절차 이용에 관한 지식

(a) 만일, 비정상적인 출력을 내는 gate가 2개 이상이면 그 gate들에 공통적으로 연결된 common gate가 있는가를 먼저 조사해라.

(b) 진단의 방향을 선택해야할 때에는 AND/OR/X-NOR의 순서대로 하라.

2. Test-point이용에 관한 지식

(a) AND gate

; 만일 '0'출력이 고장이면, '0'를 제공하는 입력 line을 추적해 진단한다.

(b) OR gate

; 이 OR gate에서 고장이 발생.

3. 입력변경 설정에 관한 지식

(a) 입력을 모두 '1'로 가지는 AND gate가 '1'을 출력하면 그 AND gate는 고장이 아니라는 사실을 이용하라.

그림 3. 실험에서 이용된 절차적 지식의 예

Simplifying Rules	Sub-circuit
A*(A+B)=A	(2, 7), (14, 21), (20, 25), (24, 29)
(A+B)+(A*B)=A+B	(32, 33, 39)
(A*B)*(A+B)=A*B	(1, 2, 6)
(A+B)*(A⊙B)=A*B	(3, 4, 9)
A⊙(A⊙B)=B	(3, 8)
(A+B)+(A⊙B)=1	(15, 16, 22)
(A+B)*(A⊙B)=A*B	(35, 36, 41)

+ : OR gate
* : AND gate
⊙ : X-NOR gate
( ) : gate number

그림 4. 7개의 simplifying-rules 및 관련 sub-circuit

simple-type 문제에서는 거의 존재하지 않는다.

(2) 피실험자

KAIST 산업공학과 학사과정에 있는 학생 20명이 실험에 참여했다. 그러나 예비실험과 훈련을 마친후에 보다 안정된 진단 수행도를 보인 14명만을 선발해서 주 실험에 참여시켰다. 이것은 실험의 정확도를 높이기 위함이다. 실험에 참여한 피실험자는 모두 논리회로에 관한 기본적 지식이 없었다.

(3) 수행도의 척도

고장진단의 수행도를 평가하기 위한 척도로서 1) 고장진단 시간, 2) test-point 이용 횟수, 3) 입력변경 테스트 횟수, 4) 벌점의 4가지를 이용했다. 벌점은 진단시간과 test-point 이용 횟수에 관한 함수로써 두 척도의 trade-off를 보완하고자 도입한 것이다.

(4) 문제의 구성

실험에서 발생한 고장은 두가지 형태의 문제로 나누어진다. 4문제는 simple-type으로 2개의 고장 후보를 가지며 입력 변경 테스트를 하지 않고도 test-point의 이용만으로 진단이 가능한 문제들이다. 이 형태는 복잡도가 낮아서 절차적 지식의 이용만으로 진단을 할 수 있는 문제들이다. 반면, 나머지 4문제는 complex-type으로 2개이상의 고장 후보를 가지며, 정확한 고장을 진단하기 위해서 입력변경 테스트를 해야한다. 이 형태는 인지적 복잡도가 높은 문제들이며 절차적 지식의 이용만으로는 진단할 수 없고, 원리적 지식을 함께 이용해야 하는 문제들이다.

그림 5(a)는 simple-type 문제의 예를 보여준다. 회로가 정상적으로 작동한다면 5번 gate가 '0'를 출력해야 하는 데, '1'을 출력하고 있다. 이는 회로를 구성하고 있는 어느 한 gate가 고장났음을 의미한다. 2번 gate와 4번 gate가 고장난 gate의 후보로써 선택된다. 언뜻 보기에 두 개의 고장 후보중에서 실제로 고장난 gate를 찾기 위해 입력변경이 필요할 것으로 생각되나, test-point인 7번 gate를 이용하면 쉽게 가려낼 수 있다. 7번 gate의 출력이 만일 '0'면 6번의 출력이 '0'임을 의미하고, 이것은 2번 gate가 고장났음을 의미한다. 반대로, 7번 gate의 출력이 '1'이라면 4번 gate가 고장임을 의미한다.

그림 5(b)는 complex-type 문제의 예를 보여준다. 정상적인 경우 5번 gate가 '0'를 출력해야 하나 '1'을 출력하므로 고장났음을 의

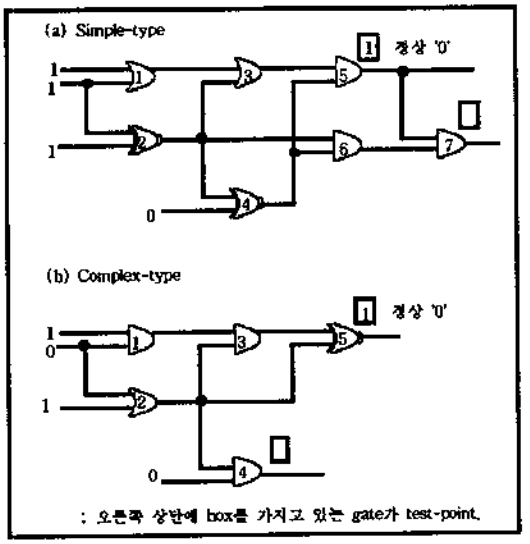

그림 5. Simple-type 문제와 complex-type 문제의 예

미하며, 고장난 gate의 후보로 2번 gate와 5번 gate가 선택된다. 그런데, 이 상황에서는 (a)에서와는 다르게 입력을 변경하지 않고는 실제로 고장난 gate를 가려낼 수 없다. 이 상태에서 test-point인 4번 gate는 고장후보인 2번 gate의 출력과는 상관없이 항상 '0'를 출력하므로 유용한 정보를 제공해 주지 못한다. 모든 입력이 '1'이 되도록 입력을 변경했을 때 5번 gate의 출력이 '0'이면 5번 gate가 원래 고장이었음을 의미하고, 반대로 '1'을 출력하면 2번 gate가 고장이었음을 의미한다. 여러 후보중에서 실제로 고장난 gate를 찾기 위해 요구되는 입력변경은 큰 인지적 부담이 되며, 진단 수행도에 영향을 미치게 된다.

(5) 실험계획

그룹과 문제가 주 요인(main factor)으로 이용되었다. 그룹의 피실험자들은 각 그룹내에서 'nested' 되었고, 각 그룹간 피실험자들의 수행도를 비교하기 위해서 'between subject' 실험을 설계하였다.

(6) 실험의 절차

그림 6은 실험절차의 개요를 보여준다. 각 단계의 구체적인 절차는 다음과 같다.

(가) 기본 훈련 :

(i) 20명의 피실험자는 40~50분에 걸쳐 training material을 읽는다. Training material은 시뮬레이터의 기본적 지식, 회로이론의 기본적 지식, 진단의 절차적 지식등으로 구성된다. Training material을 학습한 후에 내용을 충분히 이해했는지 점검하기 위해 실험자로부터 질문을 받는다. 응답을 제대로 못하는 경우에는 실험자와 함께 training material을 재학습한다. 응답을 제대로 할 때까지 계속 학습을 한다.

(ii) Training material 학습 후에 피실험자는 8문제를 진단하게 된다. 8문제에는 complex-type과 simple-type 문제가 모두 포함된다.

(iii) 수행도가 너무 낮거나 이상한 진단전략을 이용한 피실험자 6명을 제외하고 비교적 안정된 진단 수행도를 보인 14명을 선발한다. 선발된 14명은 두 그룹 (principle-group, procedure-group)으로 각각 7명씩 나누어지는데, 두 그룹 피실험자들이 기본 훈련에서 보여준 수행도의 평균이 거의 동일하도록 한다.

(나) 차별화 훈련 :

(i) Principle-group의 피실험자들은 약 40분에 걸쳐 원리적 지식에 관한 training material을 읽고 이해한다. 1단계 훈련과 마찬가지로 충분히 이해할 때까지 학습한다. 여기서 principle-group의 모든 피실험자들은 원리적 지식을 배우기만 하고 이용하는 방법에 대해서는 어떤 훈련도 받지 않는다.

<table>
<tr><th>단계
그룹</th><th colspan="2">기본 훈련</th><th colspan="2">차별화 훈련</th><th>주 실험</th></tr>
<tr><td>Principle-group</td><td rowspan="2">절차적 지식
습득</td><td rowspan="2">8문제 진단</td><td>원리적 지식
습득</td><td rowspan="2">6문제 진단</td><td rowspan="2">8문제 진단</td></tr>
<tr><td>Procedure-group</td><td></td></tr>
</table>

그림 6. 실험의 절차

(ii) 두 그룹의 모든 피실험자들은 모든 난이도의 6문제를 진단한다. 여기서 principle-group의 피실험자들은 원리적 지식을 이용해 진단하도록 지시받고, procedure-group의 피실험자들은 절차적 지식을 이용한 진단을 더 효율적으로 하는 훈련을 하도록 지시받는다.

(다) 주 실험:

두 그룹의 모든 피실험자들은 complex-type 4문제와 simple-type 4문제, 총 8문제를 진단한다. 피실험자가 확률적으로 진단하는 것을 막고 실험의 정확성 및 신뢰성을 보장하기 위해 실험자에게 고장에 대한 이유를 확실히 설명할 수 있을 때까지 진단을 수행한다. 추후 분석을 위해 모든 피실험자는 verbal protocol을 수행한다.

3-3. 실험 결과 및 분석[1)]

표 1은 두 그룹의 진단 수행도 결과를 보여준다. 문제의 형태별로 수행척도를 비교하면 complex-type 문제가 simple-type 문제보다 더 많은 진단시간과 정보획득을 요구하고 있으며, 이는 문제 난이도등의 특성을 고려할 때 당연한 결과로 받아들여진다. 정보획득이란 test-point의 출력이나 입력변경에 따른 출력의 변화를 알아보는 것을 의미한다. 모든 수행도 척도에서 principle-group이 procedure-group에 비해 대부분 우수하며 complex-type 문제에서 더 차이가 남을 알 수 있다.

표 2(a)는 simple-type 문제의 ANOVA 결과를 보여준다. 두 그룹간에는 모든 척도에서 통계적인 유의차가 존재하지 않았다. test-point 이용 횟수가 개인간에 통계적으로 유의한 차를 보였으며, 이는 수행도가 비슷하더

1) 실험 데이터를 분석할 때 다음의 경우에 해당하는 데이터는 outlier로 간주하여 결측치로 분석함.
(데이터 〉 동일 척도에서 해당 피실험자 수행도의 평균 + 2*해당 피실험자 수행도의 표준편차) AND
(데이터 〉 동일 척도, 그룹내에서 해당 문제의 평균 + 2*해당 문제의 표준편차)
이 경우에 해당하는 데이터는 test-point이용 횟수에서 3개, 벌점에서 3개였다.
이 경우는 피실험자가 문제해결에 적극성을 보이지 않은 것으로 관찰되었기에 피실험자 자신의 정상적인 수행도 및 해당 문제에 대한 동일그룹내의 다른 피실험자들의 평균적인 수행도를 감안하여 실험목적에 부적합한 outlier로 간주함.

라도 개인적으로 다른 진단전략을 사용함을 의미한다. 문제유형도 다른 진단전략을 사용하게 하는 요인이 됨을 알 수 있다.

표 1. 수행척도의 평균(표준편차)

척도	고장 형태	Principle-group	Procedure-group
진단시간	All	416 (45)	540 (117)
	Simple	269 (74)	293 (92)
	Complex	563 (55)	788 (227)
Test-point 이용 횟수	All	9.643 (2.843)	16.500 (8.725)
	Simple	8.536 (2.834)	10.750 (5.074)
	Complex	10.750 (3.129)	22.250 (12.618)
입력변경 횟수	All	1.500 (0.621)	2.679 (2.002)
	Simple	0.750 (0.500)	0.750 (0.629)
	Complex	2.250 (0.890)	4.607 (3.538)
벌점	All	695 (68)	1051 (380)
	Simple	513 (97)	628 (232)
	Complex	878 (87)	1473 (584)

표 2(b)는 complex-type 문제의 ANOVA 결과를 보여준다. Simple-type 문제의 경우와 비교하면 중요한 차이가 있다. 3가지 척도, 즉 진단시간, test-point이용 횟수 및 벌점에서 principle-group이 우수했으며 통계적으로 유의한 차가 존재하였다. Complex-type 문제에서는 test-point 이용 횟수와 입력변경 횟수가 개인간에 유의한 차를 보이며 변화하였는데, 이는 진단시간에서의 상대적으로 작은 분산을 고려할 때 개인간 진단전략의 차이로 볼 수 있을 것이다. Simple-type 문제에서도 유사한 현상이 있었으나 문제가 간단하여 입력변경의 필요가 크지 않았기에 그 측정치는 complex-type에서만 유의하게 검출된 것으로 판단된다. 고장이 complex-type일 때 문제 난이도가 더 큰 변동을 가짐에 따라 3가지 척도에서 problem 요인이 통계적으로 유의한 차를 나타낸다.

결론적으로 제안된 두가지의 가설은 실험적으로 검증되었다. 진단 수행도에 대한 원리적 지식의 효과는 존재하고, 효과의 정도는 문제의 복잡도에 의존한다. 원리적 지식은 복잡도가 높은 고장을 진단할 때 특히 효과적이었다. 복잡도가 낮은 고장의 경우 절차적 지식만으로도 충분히 진단이 가능해 원리적 지식의 효과는 거의 나타나지 않은 것으로 보인다.

또한 표 1은 complex-type 문제의 경우 principle-group이 평균적으로 우수한 결과를 보임과 동시에 보다 작은 표준편차를 가짐을 나타낸다. 이 결과는 모든 척도에서 일관적으로 관측되며, principle-group의 피실험자들은 안정된 진단전략을 이용한 반면 procedure-group의 피실험자들은 시행착오적(trial and error) 전략에 보다 많이 의존했음을 의미한다. 그리고 simple-type 문제에 비해 complex-type 문제에서 진단시간이 많이 증가되었음에도 불구하고 principle-group은 test-point 이용 횟수 및 입력변경 횟수가 작게 증가한 반면, procedure-group은 상대적으로 큰 증가를 보였다.

가장 설득력있는 해석은 원리적 지식이 피실험자로 하여금 회로에 대한 전체적인 구조 및 기능을 알게하여 보다 좋은 전략을 사용할 수 있게 하였다는 것이다. 실험과정에서 거의 모든 피실험자들이 처음에는 절차적 지식만을 이용해 진단을 수행하려는 경향을 보이는 것이 관찰되었다. 절차적 지식은 문제형태에 상관없이 작은 인지적 부담을 주기 때문으로 해석된다. 복잡한 문제의 경우 특

표 2. ANOVA로부터 계산된 P_값

(a) simple-type 문제

척도 / 요인	진단시간	Test-point 이용 횟수	입력변경 횟수	벌점
그룹	0.6021	0.3334	1.0000	0.2484
피실험자(그룹)	0.4894	0.0048**	0.3493	0.1098
문제	0.7533	0.0075**	0.6078	0.5240
그룹*문제	0.2889	0.6785	0.1308	0.3617

(b) complex-type 문제

척도 / 요인	진단시간	Test-point 이용 횟수	입력변경 횟수	벌점
그룹	0.0259*	0.0374*	0.1131	0.0204*
실험자(그룹)	0.6635	0.0002**	0.0019**	0.0645
문제	0.0004**	0.0170*	0.1727	0.0033**
그룹*문제	0.1409	0.0598	0.0662	0.0463*

정 가설기반의 추론이 많이 요구되기 때문에 피실험자들은 가설을 검증할 수 있는 정보의 소재와 내용을 알아내기 위하여 회로의 인과관계 (causalities)를 따라가면서 전향적 추론 (forward reasoning)을 이용할 필요가 생긴다. Principle-group의 피실험자들은 작은 인지적 부담으로 전향적 추론을 수행할 수 있으므로 적극적으로 이를 사용한 반면, procedure-group의 피실험자들은 이론상으로는 동일한 전향추론이 가능하나 인지적 부담이 크므로 대신 시행착오적으로 상황을 변경해가며 데이터를 수집하는 전략을 취한 것으로 보인다. Test-point 이용 횟수 및 입력변경 횟수가 procedure-group에서 많이 증가한 것이 위의 관찰을 뒷받침하고 있다. 그러므로 complex-type 문제에서 원리적 지식은 가설에 입각한 깊은 추론 (deep reasoning)을 인지적 용량내에서 사용가능하게 함으로써 진단효율을 높이는데 도움이 되었다고 볼 수 있다.

다시말하면 원리적 지식은 시스템 구성요소들간의 연관관계에 대한 보다 많은 지식을 제공하고 결과적으로 진단자에게 진단해야할 시스템을 인지적으로 작게 해주는 결과를 초래했다. 사람으로 하여금 보다 쉽고 신뢰성 있게 시스템의 구조와 기능의 지식을 이용하게 하는 것은 원리적 지식이 여러 분야에서 지니는 특징이다. 따라서 지금까지 설명된 결과는 기계시스템 및 발전소 등을 포함한 여러 다른 형태의 시스템에 일반화될 수 있을 것이다.

VI. 결론 및 추후 연구방향

본 논문에서는 고장진단에 대한 원리적 지식의 효과가 존재함을 검증한 실험을 소개하였다. 원리적 지식의 효과는 고장의 복잡도에 의존해서 달라짐을 알 수 있었다. 관측 및 기록된 실험자료와 피실험자의 행위는 원리적 지식의 장점의 근원을 제시하였다. 원리적 지식은 전향추론에 관련된 인지적 부담 및 위험을 감소시켜주어 복잡한 문제에 대한 보다 나은 진단전략을 이용하도록 하였다.

복잡도는 단순히 문제의 크기가 아니고 문제에 대한 인지적인 요구 (cognitive requirements)라고 할 수 있다. 만일 실험에서 회로의 크기가 작고 모든 gate에서 테스트가 가능했다면 절차적 지식만으로 충분히 모든 고장을 진단이 가능하여 두 그룹의 차이가 복잡한 문제에서조차 거의 존재하지 않았을 것이다.

본 연구결과는 운전원 훈련, 정보지원 및 자동진단 설계에 중요한 배경지식을 제공해준다. 고장 진단에 특별히 효과적인 원리적

지식이 규명되어야 하고 적절하게 설계되어야 한다. 진단자에게 제공할 진단전략은 두 형태의 지식을 결합해서 통일된 체계하에 사용될 수 있도록 설계되어야 한다. 그러나 가능한 한 시스템 설계자는 인지적 부담이 작은 절차적 지식의 유용성이 확장될 수 있도록 보다 많은 피드백 (e.g. sensor)이 제공될 수 있는 시스템을 설계해야 한다. 아울러 진단자가 다른 형태의 지식을 이용해 진단할 경우, 각 경우에 적합한 정보지원 시스템 요건에 대한 연구도 함께 이루어져야 한다.

References

[1] Chandrasekaran, B. and Mital, S., "Deep versus compiled knowledge approaches to diagnostic problem solving," Int. J. of Man-Machine Studies, Vol. 19, pp. 425-436, 1983.

[2] Davis, R., "Diagnostic reasoning based on structure and behavior," Artificial Intelligence, Vol. 24, pp. 347-410, 1984.

[3] Davis, R., "Reasoning from first principles in electronic troubleshooting," Int. J. of Man-Machine Studies, Vol. 19, pp. 403-423, 1983.

[4] Duncan, K.D. and Praetorius, N., "Knowledge capture for fault diagnosis training," in Rouse,W.B. (ed.), *Advances in man-machine systems research*, Vol 3, JAI Press, 1987.

[5] Genesereth, M.R., "The use of design descriptions in automated diagnosis," Artificial Intelligence, Vol. 24, pp. 411-436, 1984.

[6] Kragt, H. and Landweerd, J.A., "Mental skills and process control," in Edwards, E. and Lee, F.P. (ed.), *The human operator in process control*, Taylor Francis (London), 1974.

[7] Milne, R., "Strategies for diagnosis," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 17(3), pp. 333-339, 1987.

[8] Morris, N.M. and Rouse, W.B., "Review and evaluation of empirical research in troubleshooting," Human Factors, Vol. 27 (5), pp. 503-530, 1985.

[9] Morris, N.M. and Rouse, W.B., "The effects of type of knowledge upon human problem solving in a process control task," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 15(6), pp. 698-707, 1985.

[10] Rasmussen, J., "Skills, rules, and knowledge : signals, signs, and symbols, and other directions in human performance models," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 13(3), pp. 257-266, 1983.

[11] Rasmussen, J., "Diagnostic reasoning in action," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 23(4), pp. 981-992, 1993.

[12] Rouse, W.B., "Model of human problem solving : detection, diagnosis, and compensation for system failures," Automatica, Vol. 19(6), pp. 613-625, 1983.

[13] Sanderson, P.M., "Knowledge acquisition and fault diagnosis : Experiments with

PLAULT," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 20(1), pp. 225-242, 1990.

[14] Schaafstal, A., "Knowledge and strategies in diagnostic skill," Ergonomics, Vol. 36 (11), pp. 1305- 1316, 1993.

[15] Shepherd, A., Marshall, E.C., Turner, A., and Duncan, K.D., "Diagnosis of plant failures from a control panel : A comparison of three training methods," Ergonomics, Vol. 20(4), pp. 347-361, 1977.

[16] Surgenor, B.W. and McGeachy, J.D., "Validation for performance measurement in the task of fault management," in *Proc. 27th annual meeting human factors society*, pp. 1058-1062, 1983.

[17] Wickens, C.D., *Engineering Psychology and Human Performance*, Columbus, OH: Charles E. Merril, 1984.

[18] Yoon, W.C. and Hammer, J.M., "Aiding the operator during novel fault diagnosis," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 18(1), pp. 142-147, 1988.

[19] Yoon, W.C. and Hammer, J.M., " Deep-reasoning fault diagnosis : an aid and a model," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, Vol. 18(4), pp. 659-676, 1988.

95년 7월 최초 접수, 96년 6월 최종 수정