

화학공정 결함진단을 위한 전문가 시스템 적용에 관한 고찰

오 전근, 윤 인섭
서울대학교 화학공학과

Review of Expert System Applications to Chemical Process Fault Diagnosis

Jeon-Keun Oh, En Sup Yoon
Dept. of Chem. Eng., Seoul Nat'l University

Abstract

Process failures can occur at any time during operation, so a continuous effort of fault detection, diagnosis, and correction is required. Expert system paradigm has been regarded as a promising approach to real time process supervisory control especially to fault diagnosis.

The most important aspects of fault diagnostic expert systems (FDES) are the problem-solving inference strategy and knowledge organizations. The necessity of FDES, the nature of diagnostic knowledge, the representation of knowledge, and the inference mechanism of FDES, et al. are described, which are announced by previous researchers. And the existing FDES are categorized and critically reviewed in this work.

1. 서론

화학공정이 최근에는 점점 서로 병합되어 가고 복잡한 제어 구조 및 장치들을 지니게 됨에 따라 그 구조가 더욱 복잡하게 되고 있다. 따라서 공정의 장치나 기구에 고장이 생기면 운전자(operator)들이 조속하고 정확한 고장 발생 발견(detection)과 고장 원인 진단(diagnosis)을 하기가 매우 어렵다. 만일 발생된 결함(fault)을 고쳐 주지 못하고 그대로 방치하면 때때로 위험한 상태로 발전한다. 심한 경우 TMI(1979), Bhopal(1984), Chernobil(1986) 사고등과 같이 인명과 재산에 막대한 손실을 가할 수 있는 커다란 사고로 발전할 수도 있고, 대개는 자동 차단 시스템(automatic interlock system)이 작동하여 공정이 섯다운(shutdown)된다.

최근에는 점점 더 안전에 대한 사회적 요구가 증대되고 법률적 요건도 강화되어 가고 아울러 장치와 인명에 손실을 주는 사고의 방지와 섯다운으로 인한 조업 중단 손실을 감소시키기 위해 최근 화학공정 부문에서는 조업성과 안전성 증대를 위한 연구와 투자를 늘리고 있다.

지금까지 결함의 발견 및 진단은 주로 경험있는 공정운전자에게 의존하고 있다. 즉 경보기가 울리면 운전자는 결함 원인을 진단하고 취할 행동을 결정하여 실행한다. 진단 결정은 경보의 형태, 관련된 공정 변수의 값, 운전자의 지적 배

경, 훈련 정도등에 따라 내려진다. 공정 감시작업(monitoring)에 있어서 인간은 컴퓨터에 비해 몇가지 장점을 지니고 있다. 즉 불충분한 정보하에서 추론할 수 있는 능력과 융통성 있는 문제 해결 능력과 사건을 전체 공정의 조업 내용 속에서 파악할 수 있는 능력을 지니고 있다. 그러나 운전자에게만 의존하는 결함 처리 방법은 뚜렷한 한계를 지니고 있다. 공정 전문가가 진단하는 능력은 작업교대, 근무자의 변동, 휴가등의 이유로 사람마다 달라질 수 있고 스트레스, 피로, 태만등과 불완전한 기억력으로 인하여 부정확한 추론을 할 수 있다. 또한 이들은 많은 양의 데이터 특히 수치적 데이터를 다루는 데에는 많은 어려움이 있다. 따라서 컴퓨터를 이용한 결함 진단(fault diagnosis) 문제는 많은 사람들의 연구 대상이 되어 왔다.

그러나 진단작업은 추론과 의사결정이라는 매우 지적인(intelligent) 작업이어서 종래의 알고리즘적 방법만으로는 문제해결에 많은 한계를 드러내었다. 이를 극복 하기위한 방안으로서 전문가 시스템 패러다임(expert system paradigm)을 이용하는 연구가 최근 매우 활발하게 진행되고 있다. 따라서 본고에서는 전문가 시스템 패러다임을 사용하는 화학 공정의 결함 진단 시스템의 필요성, 지식특성, 방법론등을 지금까지의 기존 연구 결과를 토대로 하여 고찰하고 기존의 구현된(implemented) 시스템의 장단점을 고찰하여 정리하고자 한다.

2. 결함 진단 방법론

결함진단 방법의 범주는 Himmelblau(1978)에 의하여 체계적으로 분류되고 정리되었다. 그 이후로 결함 진단 방법에 관해 연구된 내용들까지 포함하여 접근법을 분류하면 정성적 접근법(qualitative approaches)과 정량적 접근법(quantitative approach)으로 다시분류할 수 있다(Kramer, 1986; Kramer & Palowitch, 1987).

정성적 접근법에는 결함 트리(fault tree), 경보 트리(alarm tree), 원인 귀결(cause-consequence)등의 정보 흐름 그래프를 작성하여 진단에 사용하는 계통이 있다. 이러한 논리 트리 계통의 접근법은 처음에는 원자력 산업 분야에서 활발히 연구되었는데 지금까지 널리 이용되지는 못하고 있다. 이러한 접근법들의 문제점은 트리구조를 합성(synthe-

sis)하고 검증하는데 혼란이 있고, 논리트리 구성하는데 과도한 노력이 요구되며, 공장이 변경될때 논리트리의 개조와 수정이 어렵다는 점이다.

논리트리 계통과 유사한 방법으로서 패턴인식 방법이 있는데 이 방법은 리스트 프로세싱 알고리즘(list processing algorithm)에 근거하고 있어 결함사전(fault dictionary)이라는 테이블을 미리 데이터로 저장하여 이상증상이 발생했을 때 패턴일치 방법으로 고장을 진단하는 경험적 접근법이다(O'Shima, 1983). 그런데 실제로 결함트리와 패턴인식 방법을 컴퓨터에 구현할때는 Yoon(1982, 1986)의 결과에서 보듯이 별 다른 차이가 없고, 따라서 논리트리 접근법과 유사한 한계를 지닌다. 이 두 방법론은 예기치 않은 결함(anticipated fault) 즉 리스트되지 않은 결함이 발생했을 때 이를 진단할 수 없다는 한계를 지니고 있다.

또 다른 정성적 접근법은 O'Shima등(Iri et al., 1979; Shiozaki et al., 1985)에 의한 부호 방향 그래프(signed directed graph)를 이용하는 인과모델(cause-effect model) 방법이다. SDG(부호 방향 그래프)는 공정의 인과 관계를 나타내는 도표이다. SDG는 변수를 나타내는 노드와, 어떤 변수에 영향을 미치는지의 방향과 어떻게 영향을 미치는지의 부호를 나타내는 부호방향선(signed directed line)으로 구성된 그래프이다. 이 방법의 장점은 방향 그래프를 그리는데 있어서 상대적으로 적은 양의 정보를 필요로 한다. 또한 모델 기반 접근법(model based approach)의 장점인 예기치 않은 결함의 원인을 진단할 수 있는 가능성을 지니고 있다. 이 방법의 한계는 모든 시스템의 증상들은 하나의 결함 원인에서 생긴 것으로 가정하는데, 실제의 경우에 있어서는 때때로 다수의 원인이 존재할 수 있어 다중 결함(multiple fault)을 다룰 수 없다는 점이다(Rich & Venkatasubramanian, 1987). 그리고 결함을 진단하는 알고리즘이 너무 복잡하고 시간도 오래 걸리는 점과, 실제 공정에 적용했을 때 진단의 회절도(resolution)가 그다지 좋지 않아 너무 많은 결함 후보(candidates)를 제시하는 점등이 문제로 지적되고 있다(Kramer & Palowitch, 1987). 그런데 이러한 문제점들은 전문가 시스템 접근법과 결합되어 극복될 가능성을 보이고 있다(Rich & Venkatasubramanian, 1987; Kramer & Palowitch, 1987).

앞에서 열거한 정성적 접근법을 사용하는 제 방법은 공통적으로 경보 발단점(alarm threshold)에서의 감도(sensitivity)에 관한 문제점을 가지고 있다. 왜냐하면 경보가 울리고 꺼지는 온 오프(on-off)의 상태가 불연속적(discrete)으로 변하게 되므로 만일 경보기의 작동 발단점을 충분히 높게하면 지나친 경보 발생과 경보의 혼동을 줄일 수 있으나 결함진단의 감도가 떨어져 위험한 상태를 발견하지 못할 수 있다. 반대로 작동 발단점을 낮게하면 증상의 혼동이 생겨 정확하게 결함을 진단하기가 어렵다. 이러한 문제는 증상(symptom)을 정상, 높음, 낮음의 형태로만 받아 사용하는 접근법 소위 부울리안(Boolean) 접근법의 공통된 문제이다. 여기서 증상이라 함은 경보의 온 오프만을 의미하지 않고 감지기(sensor)에서 측정되는 모든 정보를 의미한다. 따라서 이러한 정보는 경보가 울리기 전에도 결함의 발생을 찾고 원

인을 조기에 진단하는데 이용할 수 있다. 아몽든 부울리안 방법의 그러한 문제점은 측정된 변수에 변동의 정도에 따른 확률 분포를 휘지논리(fuzzy logic)등의 불확실성을 다루는 확률적 방법을 도입하여 해결될 수 있다(Kramer, 1987). 그러나 이러한 방법은 정량적(quantitative) 접근법을 사용할 때 제대로 다루어 질 수 있다.

정량적 접근법은 필터링(filtering)과 추정(estimation) 방식에 근거하여 공정의 수학적 모델의 계산값과 실측치를 비교하여 결함을 찾고 진단하는 방식이다. Isermann(1984)은 정량적 접근법에 대하여 종합적 고찰을 하였다. 수학적 모델은 결함 전전(propagation)의 동적 성질을 함축적으로 내포하므로 여러 장점을 지니고 있다. 그러나 이러한 동적 모델을 사용하는 접근법은 과도한 모델링과 계산을 필요로 하여 전체 공장의 차원에서는 적용에 어려운 점이 많다. 왜냐하면 전체 공정의 감시(monitoring)와 진단에는 수학적 으로 나타내기 어렵거나 수학적으로 나타낼 필요가 없는 지식도 많이 사용되기 때문이다. 그러나 간단하면서도 진단 목적에는 적합한 구조의 정량적 모델을 만들어 정성적 방법과 혼합하여 사용할 수 있다면 정량적 접근법은 아주 유용한 방법이 될 수 있다(Kramer, 1987a,b; Dhurjati et al., 1987). 이를 위해서는 전문가 시스템 방법론이 필요하다.

3. 전문가 시스템과 결함 진단

(1) 전문가 시스템의 필요성

전문가 시스템(expert system)이란 한 전문가 또는 여러 전문가들의 문제해결능력(problem solving capabilities)을 재생산하기 위해 개발된 시스템이다. 전문가 시스템에서 가장 중요한 요소는 지식 베이스(knowledge base)와 추론기구(inference engine)인데 이들은 서로 분리되어 있는 것이 ES(expert system)의 특징이다. 지식을 룰(rule)등의 여러가지 표현 형태로 지식 베이스에 저장하여 두고 있다가 실행시 추론기구는 필요한 지식을 선택하여 추론을 통하여 주어진 문제를 해결한다. 따라서 ES를 지식 베이스 시스템이라고 한다.

ES의 개발 효과를 정리해 보면 다음과 같다(Kramer, 1987b).

- 운전자의 작업을 컴퓨터로 이전하여 생산성이 향상된다.
- 전문지식을 유포시키고 표준화 시킨다.
- 여러 전문가의 지식을 합치고 정리하므로 지식이 세련된다.
- 추론 과정을 컴퓨터가 설명할 수 있다.
- 빠르고 정확하고 일관성 있는 정보처리 역량을 확보한다.
- 규칙(rule)을 점진적으로 추가할 수 있어 시스템의 점진적 발전을 도모 할 수 있다.
- 근본적 원리가 부족하고 단지 휴리스틱만 이용 가능하던 문제를 시스템으로 구현할 수 있다. 따라서 알고리즘적 접근법만으로는 충분치 않았던 여러 공학적 문제의 해결이 가능하게 되었다.

따라서 ES는 실시간 공정 감독 제어(real-time process supervisory control)의 유망한 접근법으로 간주되고 있다

(Moore, 1985). 공정 시스템의 설계 정보와, 공정 엔지니어와 조업자의 축적된 경험, 판단기준, 휴리스틱등을 지식 베이스로 만들고 추론 방식(reasoning mechanism)을 적용시켜 결함 원인의 진단과 처방(prognosis) 문제에 전문가 시스템 패러다임을 적용시킬 수 있다. 진단과 처방(prognosis)이란 여러 증상이나 증상을 가지고 추론을 통하여 원인 진단과 다음의 처리(correction) 행동을 결정하는 일종의 의사결정 과정으로 매우 지적인(intelligent) 과정이다. Himmelblau(1978)는 이러한 지적인 작업은 인간이 훨씬 우월하여 이 과정을 컴퓨터에 전적으로 의존하는 것은 '미래의 꿈'일 것이라고 생각하였는데 ES 패러다임은 이 꿈을 실현시킬 접근법이되고 있다. 왜냐하면 ES는 많은 부분이 기호(symbol)로 표현될 수 있는 전문가의 경험이나 휴리스틱을 사용한 추론작업에 아주 유용한 패러다임을 지닌 시스템이기 때문이다.

결함 진단 전문가 시스템(FDES: fault diagnostic expert system)은 일반적으로 그 구조를 그림 1과 같이 나타낼 수 있다. 종래의 결함진단 시스템에 비하여 여러가지 장점을 지니고 있어, 중국에는 결함진단 전문가의 역할을 수행하면서 동시에 이들의 한계를 극복할 수 있는 시스템으로 개발될 수 있다.

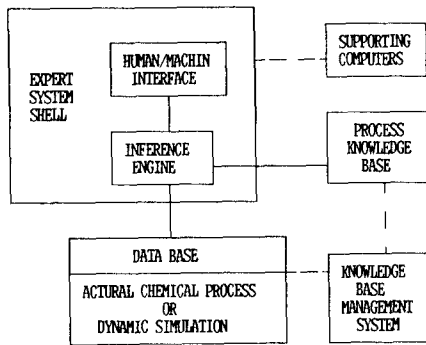


그림 1. 일반적인 FDES의 구조

(2) 화학공정 FDES의 지식특성

복잡한 화학공장에 관한 지식공학은 의학진단과 같은 비공학적인 시스템에 대한 지식베이스를 구축하는 과정과는 매우 다르다. 의학진단 영역에 있어서 ES는 특정 계통의 질병에 대해서 전문가로 알려진 한명 혹은 그 이상의 의사의 경험에 주로 근거를 두고 있다.

그러나 화학공정의 지식은 많은 부분이 시스템의 동적성질과 보존법칙에 관한 지식, 물리화학적 계 원리등의 구조적지식이고, 경험, 휴리스틱등의 비구조적 지식은 적은 부분을 차지한다. 따라서 화학공정의 진단은 나름대로 독특하게 다루어져야 한다. 화학공정의 FDES를 다른 경험적 진단 문제와 똑같이 경험적 지식에만 의존하여 구현하려 하는 것은 이상적 접근이라고 볼 수 없다. 이러한 접근은 원래 ES는 휴리스틱등의 지식을 지식 베이스에 룰로 저장하여 기호적처리만을 위주로 하는 것이라고 단정하여, ES를 위하여 공정이 지니는 수학적이고 정량적인 모델을 버리고 정성적 지식만을

사용하려는 데서 생기는 오류이다.

모델은 때로는 간단한 형태로 많은 공학적 지식을 함축할 수 있는 장점을 지니고 있다. 특히 정량적 모델은 정성적 모델보다 많은 양의 정보를 내포할 수 있다. 그러나 때로는 모델링하기가 어렵거나 복잡한 부분도 많다. 따라서 화학공정 FDES의 지식표현은 정량적 수학적 모델, 때로는 정성적 모델등의 구조적 지식을 위주로 하면서 비구조적 지식인 경험과 휴리스틱을 보완적으로 사용하는 것이 바람직하다.

(3) FDES의 구성(Architecture)과 개발 툴(Tool)

앞에서 다룬바와 같은 FDES의 지식 영역의 특성을 제대로 나타내고 다루기위해서는 적절한 지식표현(knowledge representation)과 추론엔진(inference engine)에 대한 연구가 핵심적으로 수행되어야 한다. 특히 FDES의 지식은, 수학적 표현등과 같은 저차원(low level)의 지식표현으로부터 경험적 지식같은 고차원의 지식표현까지 넓은 스펙트럼을 형성하고 있다. 따라서 FDES를 실제로 구현(implementation)하기 위해서는 몇개의 지식표현 방법을 결합한 혼성 지식표현(hybrid knowledge representation)을 채택하여 사용한다. 이러한 개발환경을 제공하는 여러가지 개발 툴(building tool)이 만들어져 있다(Gevarter, 1987). 특히 FDES에서 사용할 수 있는 여러 지식표현과 추론엔진의 추론전략을 그림2에 나타내었다.

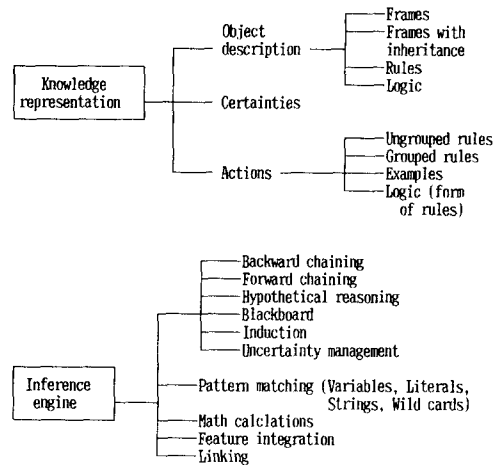


그림 2. FDES의 지식표현과 추론엔진의 여러 가능성.

가) 지식표현

지식표현의 근간이 되는 이용가능한 기술중에서 가장 기본이 되는 것은 프레임과 프러덕션 시스템이다. 프레임은 전형적인 대상이나 상황의 구조적 표현을 테이블 데이터의 구조로 나타낸다. 이는 대상물의 기술(description)을 위해 사용한다. 프레임은 슬롯(slot)을 가지고 있어 대상물과 상황에 맞는 관계와 데이터로 채워져 있는데 디폴트(default) 정보를 넣어 이용할 수도 있다. 또한 프레임은 포인터에 의해 프레임을 서로 연결하여 계통구조를 형성하는 경우도 있다. 이러한 프레임은 구조적 지식을 표현하는데 적합한

Rich & Venkatasubramanian의 MODEX 시스템에서 사용하였다. 여기서 사용한 프레임의 한 예를 그림 3에 나타내었다.

inlet connected to:	VALVE 1
outlet connected to:	TANK 1
flow rate:	LOW
pressure:	HIGH
temperature:	NORMAL
state of pipe (through which stream flows):	BLOCKED

그림 3. STREAM 3에 대한 프레임 예.

프러덕션은 대상의 기술에 사용할 수 있으나 그다지 적합하지 않고 주로 상황을 바꾸거나 상용하는 데이터베이스를 바꾸어주는 행위(action)를 나타내는데 이용된다. 이 형태는 전문가의 경험이나 휴리스틱등을 기술하는데에 적합하다. 그리고 때로는 메타룰의 형태로 추론과정을 제어하기도 한다. 그리고 프로덕션 시스템은 풀이 서로 독립적으로 기술되어 있기때문에 쉽게 이해할 수 있고 틀단위로의 수정과 확장이 용이하다. 이밖에도 FDES에서 채택될만한 지식표현은 그림 2에서 나타내고 있다.

나) 추론과 추론엔진

규칙기반 접근법을 사용하는 전문가 시스템은 지식과 추론엔진의 추론전략이 서로 엄격히 구분된다는 가정하에 구성된다. 결합진단 영역에서 살펴볼때 이상증상(abnormal symptom)의 처음 원인을 찾는 추론과정은 지식베이스속의 규칙과 추론엔진의 상호 연관속에서 결정되게 된다. 그런데 추론엔진의 추론전략은 전문가 시스템을 구현하는 입장에서 볼때, 추론엔진속에 내재적(implicit)으로 포함된다. 그러므로 일반목적 개발 툴을 사용하는 시스템 개발자는 지식베이스속에 메타룰(meta-rule)이나 그룹룰(group rule)을 넣어 추론과정을 제어하는 내재적 제어방법을 사용해 왔다. 따라서 추론기구를 전체적으로 제어하기는 불가능하였다. Davis(1987)는 추론엔진과 지식베이스의 관련속에서 생기는 추론과정을 개발자가 분명히(explicitly) 처리하기 위해서는 두 추론과정이 통합되어야 한다고 지적하였다. 이 과정을 개발자로 지원하려면 풀은 낭연히 작업 대상 영역마다 다르게 구성되어야 함을 주장하는 일반적 작업대상 지향 풀(general task oriented framework)의 사용 제안은 주목할만 하다. 한 공정의 결합진단 문제를 잘 해결하도록 개발된 FALCON(Dhurjati, et al. 1987)과 같은 전문가 시스템은 문제해결 능력은 우수하나, 융통성이 부족하여 공정이 바뀌었을 때 아주 많은 노력이 들었던 개발과정이 어느정도 반복되어야 한다. 그러나 일반목적 개발툴로 구성된 전문가시스템은 진단 전문가와 같은 구실을 하기 어렵다. 즉, 융통성및 개발용이성과 특속한 영역(domain specific)의 문제 해결 능력을 동시에 갖추기 위해서는 작업 대상마다 나뉠대로의 틀(framework)을 갖추는 즉 모듈성을 높이는 연구가 바람직하다.

4. 화학공정 FDES의 접근 방법론

(1) 온라인(On-line)과 오프라인(Off-line)

화학공정 FDES는 공정의 감지기(sensor)로부터 증상(symptom)을 온라인으로 얻을 것인가 그렇지 않으면 오프라인으로 운전자가 공급하는가에 따라 시스템 구성과 구현의 용이성이 달라지게 된다.

오프라인 방식은 의학진단 전문가 시스템과 같이 시스템과 사용자간에 질의응답식으로 추론하는 방식이다. FDES는 운전자에게 특정 증상에 대한 정보를 요구하고, 요구에 응답하면 다른 질문을 하던가 추론결과를 제공한다. 이러한 오프라인 방식으로 구성된 FDES는 Kumamoto등(1984), Andow(1985), Fink등(1985), Rich와 Venkatasubramanian(1987) 등의 연구논문에서 소개되고 있다. 그런데 이러한 오프라인 방식은 결국 감지기의 정보에 대한 판단을 운전자에게 맡기게 되므로 구현이 비교적 용이하다. 그러나 운전자에게 한 응답이 있을때까지는 FDES는 아무런 작동을 하지 않아, 자동적 모니터링과 추론을 통하면 구할 수 있는, 위험한 상태(events)의 원인에 대한 신속한 정보를 제공하지 못한다. 따라서 이러한 경우 전문가 시스템은 전문가의 역할을 대행한다기 보다는 전문가의 조력자로서 해석도구로 이용되는 것이다. 그러나 오프라인 FDES는 질문을 통하여 인간의 종합적 판단능력을 이용하므로 여러 형태의 지식이 쉽게 통합할 수 있어, 다양한 정보를 활용할 수 있고 시스템의 융통성있는 구성이 가능해진다. 그러나 질의에 대한 응답이 보통은 부 울리안 형태의 정성적 응답이므로 FDES의 추론에 한계로 작용할 수 있다.

온라인 방식은 공장의 감지기에 통상적으로 연결되어 나오는 정보를 이용하여 결합을 자동적으로 진단한다. 온라인 방식으로 구성된 FDES는 윤과 한(1986), Quan과 Lu(1986), Dhurajati등(1987)의 연구논문에서 소개되고 있고, Kramer등(1986, 1987)의 연구도 온라인 방식을 전제하고 있다. 이 방식은 감지기에서 나오는 증상을 정량적(quantitative)으로 받아들일 수 있기때문에 정량적 모델등의 활용이 가능하다. 따라서 정량적 모델 접근법의 장점을 활용할 수 있다. 그리고 감지기로부터의 증상을 가지고 추론하는 과정이 자동적으로 이루어져 신속하게 결합 원인을 진단할 수 있고, 결합이 존재함을 찾고(detect), 위험정도를 알려주는 역할도 할 수 있어서 FDES의 여러 개발동기를 만족시킬 수 있다. 그러나 온라인 방식은 오프라인 방식에 비하여 실제로 구현하기가 매우 복잡하고 어렵다. 실제의 화학공정에 성공적으로 적용시킨 온라인 FDES FALCON(Dhurjati, 1987)은 개발노력과 시간이 상당히 소모되었다.

사건이 발생한 시간동안 운전자가 알아야만 할 정보는 비정상 사건의 발견(detection), 원인진단, 정정행위(corrective action)의 설정, 정정행위의 수행에 관한 것들이다(Andow, 1985). 그런데 전문가 시스템은 결합의 발견및 진단뿐만 아니라 비정상 사건을 바로잡는 정정행위의 처방(prognosis)에도 유용할 수 있다. 조업자는 정정행위가 가능한지, 가능하다면 무엇을 얼마나 어떻게 고쳐주는지, 행위를 취할 수 있는 시간은 있는지 등을 결정하여 정정행위를 취한다. 정정이 가능하지 않다면, 공정의 Shutdown 여부를 결정지어야 한다. 이러한 부분에는 오프라인의 대화식 전문가 시스템이 바람직할 수 있다. 따라서 공정의 감시 제어

루프(supervisory control loop)의 전체통에 걸친 전문가 시스템은 오프 라인과 온라인의 장점을 계승할 수 있도록 연구가 진행되어 갈 것으로 보인다.

(2) 기존 화학 공정 FDES의 접근법

가) 논리 트리 기반 시스템

온라인 진단을 위해 결합 트리(fault tree) 방법을 개조한 증상 트리(symptom tree)방법에 기초하여 Han(1986), 윤과 한(1986)은 시멘트 소성 공정의 감독 제어 및 진단을 위한 프로토타입 ES인 EXCECOND를 개발하였다. Kumamoto(1984)는 배 엔진의 냉각 시스템의 결합을 찾는 오프라인의 간단한 ES를 개발하였다. 여기서도 결합트리를 틀베이스 형태로 구현하기 편리하게 만든 앤드/오어(and/or)트리를 기반으로 대화식 틀베이스 ES를 구성하였다. 그림 4는 Kumamoto(1984)의 틀베이스를 이용하여 우리가 OPS5로 구현한 FDES의 간단한 대화식 추론 과정을 나타낸 것이다.

여기서 우리는 논리트리와 프러덕션 룰 형태의 표현법과는

```
kops> (RUN)
1. RULE-1 1
THE ENGINE OVERHEATS.
THE ENGINE ITSELF IS NOT THE CAUSE.
IS IT TRUE? TYPE T OR F. t
THE PRESSURE GAUGE READING OF THE FRESH WATER IS LOW.
IS IT TRUE? TYPE T OR F. f
2. RULE-10-1 2 3
THE WARM-UP STEAM VALVE IS OPEN.
IS IT TRUE? TYPE T OR F. t
3. RULE-11 2 3 4
*****
FAILURE TO CLOSE THE WARM-UP VALVE AFTER START-UP ENGINE
IS RESPONSIBLE FOR THE OVERHEAT.
*****
```

그림4. Ship Engine FDES의 간단한 대화내용.

매우 유사한 점이있어 기존의 논리 트리 계통의 결합 진단 방법이 바로 틀베이스 전문가 시스템으로 구현될 수 있음을 알았다. 그런데 프러덕션 룰 형태의 지식 표현은 나타내려는 대상(object)과 룰 형태 사이에 뚜렷하게 서로 맵핑(mapping)이 되지않아 대상을 제대로 나타내기가 힘들고, 약간의 공정만 바뀌어도 많은 룰에 연쇄적인변화를 가져오고, 일반적인 정보와 공정마다 특수한(process-specific) 정보의 구분이 없어 이동성(portability)이 떨어진다. 이러한 결점은 종래의 논리 기반 시스템에서 가지던 문제점과 일치한다.

나) 정성적 모델 기반 시스템

Kramer & Palowitch(1987)은 SDG(부호방향그래프)을 룰 기반 형태로 바꾸어 온라인 FDES에 있어서 공정 조업에 관계되는 다른 룰과 함께 사용할 수 있도록 하였다. 룰 기반 형태 바꾸어 줌으로써 SDG의 단점으로 지적되었던 긴 계산 시간과 나쁜 진단 회절도(resolution)를 개선할 수 있었다. 그러나 단일 결합 가정은 그대로 유지하고 있고, 프러덕션

룰 형 태의 지식 표현이 가지는 한계는 그대로 지니게 된다.

Rich & Venkatasubramanian(1987)은 MODEX라는 오프 라인 대화식 FDES를 구성하였다. 여기에서는 혼성 지식 표현(hybrid knowledge)방법을 사용하였다. 종래의 FDES의 지식 베이스가 공정마다 특수(process-specific)하여 공정의 변화에 융통성이 없던 점을 MODEX는 프레임의 모듈화된 대상물의 지식 표현방법으로 구현하여 공정 일반적(process-general)이고 융통성을 가지도록 구성하였다.

혼성 지식 표현은 대상을 묘사하는 프레임과 행동적 지식(behavioral knowledge)을 나타내는 프러덕션 룰로 구성하였다. 프레임은 그림 3과 같이 표현되는데 MacLISP로 구현하였고, 프러덕션 룰은 OPS5로 구현하고 있고, 서로간의 연계(interface)는 MacLISP의 기능(function)을 이용하고 있다. 또한 MODEX는 다수의 결합 원인이 있는지를 대화물 통해 계속 검색할 수 있도록 한다. 그러나 MODEX는 오프라인 FDES란 점에서 한계가 있다.

위에서 열거한 정성적 모델 기반 시스템은 경보 발단점 감도(alarm threshold sensitivity) 문제를 공통적으로 드러낸다.

다) 정량적 모델 기반 시스템

공정의 열 및 물질 수지와 속도 방정식, 평형 관계 등은 공정 변수의 값에 제한 조건이 되는데, 이러한 정량적 관계를 이용한 결합 진단 방법을 Kramer(1987a)는 제안하고 있다. 여기서는 센서의 증상을 정량적인 값 그대로 이용할 수 있으므로 확률적 결정 방법을 사용하여 경보 발단점 문제를 제거할 수 있는 비부울리안 접근법을 제안하였다. 여기서 확률적 결정 방법으로 사용한 간단한 퍼지 집합 이론(fuzzy set theory)은 다른 복잡한 이론 못지 않은 정확도를 나타내고 있다.

Delaware대학, duPont, Foxboro사가 공동으로 연구를 착수하여 1987년에 개발을 완수한 FALCON은 상업적 화학 공정에 적용시켜 완성된 첫번째 FDES이다. FALCON은 실제 공정이나 동적 모사(dynamic simulation)에서 나오는 증상을 온라인으로 받아들여 최소 결합 집합에 정의된 모든 결합을 진단할 수 있다. 처음에 FALCON은 정성적 접근법을 사용하였으나 성공적이지를 못하였다. 정성적 접근법만으로는 공학적 지식을 제대로 표현하기 어렵다고 판단하여, 정량적 지식 표현을 위주로 하여 정성적, 경험적 지식을 보완적으로 사용하는 시스템으로 개발하였다(Dhurjati et al.,1987).

FALCON은 실제 공정에서 성공적으로 수행되고 있으나 지식 표현이 공정 특수적(process-specific)이어서 융통성이 적고 미리 정의된 결합만 진단할 수 있는 것이 한계이다.

4. 결 토

컴퓨터를 이용한 공정의 조업성과 안전성의 향상을 위한 FDES는 진단뒤에 이어지는 정정 행위(corrective action)의 대상(what), 방법(how), 효과(state of the action)등의 정보를 제공하여줄 처방 전문가 시스템(PES)과 함께 소위 엑스퍼트 제어 루프의 가장 중요한 부분이 될것이다.

FDES는 온라인으로 진단을 수행할 수 있는 역량을 갖추는 것이 바람직하고, PES는 질의응답 방식을 취하게 될 것이다. 이때 PES는 FDES의 정보를 충분히 활용할 수 있도록 서로 통합되어야 한다.

현재 FDES는 정량적 모델과 정성적, 경험적 지식을 어떻게 논리적 연역적으로 다루어 어떻게 진단에 사용하는지의 진단 작업의 성격에 대해서 아직은 낮은 이해수준에 머물고 있다. Kramer(1987b) 등에 의한 일반적 진단 틀(general diagnostic framework)이나 Davis(1987) 등에 의한 작업위주 틀(task-oriented framework) 등은 결국 진단 작업의 일반적 틀(공정 진단틀)을 마련하여 FDES의 공통적 부분을 제공함으로써 FDES의 기동성과 유연성을 확보시키고 일반적 진단 지식을 마련하기 위한 노력으로 평가할 수 있다. GDF에서의 모델이 진단을 위해 사용될 때의 일반적 논리구조(logic structure)와 TOF에서의 진단 작업 나름의 외포적(explicit) 추론구조에 대한 개념 제시는 앞으로의 주요한 연구 테마가 될 것이라 판단된다.

그리고 FDES의 정확도와 감도를 향상시키기 위한 확률적 결정론에 대한 부분, 시스템 상태나 매개변수의 추정, 운전자와의 사용자와의 연계 등 FDES의 전반적 구성요소와 이들의 효과적 통합에 대한 연구의 많은 부분은 아직 초보적인 상태이다.

REFERENCES

- 윤 인섭, 한 중훈 (1986). 화학공장 조업중의 진단 및 제어. 화학공업과 기술, 4, 15.
- 최 희운 (1986). Bhopal 및 TMI 사고의 분석. 화학공업과 기술, 4, 6.
- Andow, P. (1985). Alarm systems and alarm analysis. Plant/Operation Progress, 4, 116.
- Davis, J.F. (1987). A task-oriented framework for diagnostic and design expert systems. FOCAPO-87, Park City, Utah.
- Dhurjati, P.S., D.E. Lamb and D.L. Chester (1987). Experience in the development of an expert system for fault diagnosis in a commercial scale chemical process. FOCAPO-87, Park City, Utah.
- Ferguson, G. and P. Andow (1986). Process plant safety and artificial intelligence. World Cong. III Chem. Eng., Tokyo, 1092.
- Fink, P.K., J.C. Lusth and J.W. Duran (1985). A general expert system design for diagnostic problem solving. IEEE PAMI, 7, 553.
- Gevarter, W.B. (1987). The nature and evaluation of commercial expert system building tool. Computer, may, 24.
- Han, J.H. (1986). A study on the knowledge-based expert system for cement calcination process control and diagnosis. M.S. Thesis, Seoul National University
- Himmelblau, D.M. (1978). Fault Detection and Diagnosis in Chemical and Petrochemical Processes. Elsevier, Amsterdam.
- Iri, M., K. Aoki, E. O'Shima and H. Matsuyama (1979). An algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. Comp. Chem. Eng., 3, 489.
- Isermann, R. (1984). Process fault detection based on modeling and estimation. Automatica, 20, 387.
- Kramer, M.A. (1987a). Malfunction diagnosis using quantitative models and non-boolean reasoning in expert systems. AIChE J., 33, 130.
- Kramer, M.A. (1987b). Expert systems for process fault diagnosis: a general framework. FOCAPO-87, Park City, Utah.
- Kramer, M.A. and B.L. Palowitch, Jr. (1987). A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph. AIChE J., 33, 1067.
- Kumamoto, H., K. Ikenchi, K. Inoue and E.J. Henley (1984). Applications of expert system techniques to fault diagnosis. The Chem. Eng. J., 29, 1.
- Lamb, D.E., D.L. Chester and P. Dhurjati (1985). An academic/industry project to develop an expert system for chemical process fault detection. AIChE Nat. Meet., Chicago, November
- Moore, R.L., L.B. Hawkinson, M.E. Levin and C.G. Knickerbocker (1985). Expert control. Proc. ACC, Boston, MA, 885.
- O'Shima, E. (1983). Computer aided plant operation. Comp. Chem. Eng., 7, 311.
- Palowitch Jr., B.L. and M.A. Kramer (1985). The application of a knowledge-based expert system to chemical plant fault diagnosis. Proc. ACC, Boston, MA, 646.
- Rich, S.H. and V. Venkatasubramanian (1987). Model-based reasoning in diagnostic expert systems for chemical process plants. Comp. Chem. Eng., 11, 111.
- Shiozaki, J., H. Matsuyama, E. O'Shima and M. Iri (1985). An improved algorithm for diagnosis of system failures in the chemical process. Comp. Chem. Eng., 9, 285.
- Quan, D.Q. and Y.Z. Lu (1986). Expert system based fault diagnosis in fluidized catalytic cracking process. World Cong. III Chem. Eng., Tokyo, 570.
- Yoon, E.S. (1982). Process failure diagnostics using the symptom sub-tree model. Ph.D. Thesis, MIT
- Yoon, E.S. (1986). On-line process failure diagnostics using the symptom sub-tree model. World Cong. III Chem. Eng., Tokyo, 1088.