

동적 모사를 이용한 이상 진단 지식 모델 합성

윤여홍, 윤인섭
서울대학교 화학공학과

Generationm of Fault Diagnosis Knowledge Base using Dynamic Simulation

Yeo Hong Yoon, En Sup Yoon
Dept. of Chemical Engineering, Seoul National University

요약

화학 공정에서의 이상 진단 시스템 개발 및 응용에 대한 연구는 지난 5년간 많은 발전이 이루어졌다. 화학 공정의 본질적인 특성으로 대형 시스템, 비선형 특성, 모델링 자체의 어려움, 공정 변수의 large dead time 및 복잡한 인과 관계 등을 들 수 있으며, 이러한 어려움에도 불구하고 적절한 이상 진단 시스템의 중요성을 인식하여, 초기에는 주로 rule-based approach가 도입되어 현장에서의 조업에 많은 도움을 주었다. 그러나 개발 기간의 단축화, 개발 과정의 표준화 뿐 아니라 개발된 시스템 자체의 일관성 등을 위하여 체계적인 접근 방법이 필요하게 되었으며, 그중 지식 베이스 합성 문제는 그동안 활발하게 연구되어 오고 있는 분야이다.

이에 본 연구에서는 기호화된 정성적인 정보를 얻기 위한 기존의 실험 방법의 한계를 극복하고자 동적 모사를 이용하여 정량적인 정보로부터 정성적인 정보를 생성시키는 방법론에 대해 연구하였다. CSTR(Continuous Stirred Tank Reactor)에서 나타날 수 있는 이상의 종류에 대한 동적 모사를 수행하여 이상 진단 시스템을 위한 지식이 생성되는 과정을 보였다.

1. 서론

하나의 화학 공장을 설계 및 건설하여 원하는 제품을 생산 하고자하는 화학 공장의 존재 목적을 달성하기 위하여 최초의 동기 부여부터 제반 사항을 고려한 설계, 그리고 건설 과정을 거친후 실제의 조업에 들어가게 된다. 그러나 실제 조업 중인 공정의 경우 처음의 설계 목적대로 이상 상태의 발생 없이 조업하는 것은 가능하지 않은 일이다. 또한 처음 설계한 때보다 발달된 관련 기술의 활용 및 축적된 지식에 의한 공정 변경 등 도 수행하게 된다. 아울러 계속적인 조업을 진행하는 과정에서 공정의 상태는 처음의 그것과는 다른 상태에 놓이게 된다. 그러므로 현장에서는 이러한 변화된 환경 속에서 공정의 상태를 운전 목적에 맞추고자하는 노력에 많은 관심을 기울이게 되는 것이다.

그러나 실제 공정은 특정 부품의 고장, 조업자의 오동작, 외적인 영향 등에 의해 하나 혹은 다수의 장치 등이 비정상 상태에 놓이게 되고 그 결과 품질 이상, 긴급 조업 중지, 사고 등의 결과로 파급되게 된다. 그러므로 공정 내에 존재하는 여러가지 데이터로부터 이러한 원하지 않는 상황이 발생하지 않도록 초기 단계에서 그 전파를 차단하는 것은 매우 중요한 일이라 할수 있을 것이다. 즉 이상 진단의 중요성은 화학 공장의 자동화와 관련하여 이상 상태의 발생 초기에 효과적으로 확인 함으로서 경제성, 안전성 등을 향상 시키고자하는 노력으로 볼수 있다.

이상 진단 문제의 풀이 과정에서 가장 핵심이 되는 부분은 지식 베이스의 구축 및 진단 전략의 채택이라 할수 있다. 초기의 진단 시스템은 주로 rule-base 형태의 지식베이스를 가졌었는데 이는 현장의 경험적인 지식을 모델링하는데 많은 노력을 들이지 않고 즉각 응용가능한 시스템을 구축하기 위한 것이었다.

그러나 많은 연구가 진행됨에따라 점차 체계화된 방법론의 도입의 필요성이 제기되게 되었으며, 이러한 과정 중 주 관심을 받게 된 분야는 다음의 두가지이다.

- 1) 지식 베이스 모델 및 추론 구조의 체계화
- 2) 진단 시스템 구축 과정의 체계화

1)의 과정중 나타난 노력의 결과는 deep knowledge model 로 대표되는 일련의 연구들로 현재까지는 단순한 모델을 대상으로한 연구가 주를 이루고 있다. 즉 이러한 접근법은 대상 공정의 topology 및 장치 정보로부터 지식 베이스로의 mapping을 추구하는 것으로 현재 이러한 연구 분야로는 지식 베이스 합성으로 대별되고 있다.

한편 2)의 경우는 시스템 개발 단계의 표준화 노력으로 이는 개발된 진단 시스템의 정확성 등에대한 효과적인 검증을 위하여 그 개발 과정을 표준화 시키고 있는 노력을 들수 있다.

그러나 지식베이스의 합성 과정 중 나타나는 중요한 문제중 하나는 공정 내에 존재하는 각 공정 변수의 정량적인 데이터를 기호화된 정성적 정보로 변환 시켜주는 과정이다. 이를위하여 Qualitative Simulation 등의 방법론이 시도되고 있다. 또다른

한편으로는 공정 내의 주요 이상 상태에 따라 적절한 정량적인 정보를 제공할 수 있는 dynamic simulation 활용의 중요성이 부각되게 되었다. 현재까지는 주로 과거의 이상 조건 혹은 사고 데이터와 같은 형태로 정량적인 데이터를 얻어왔다.

동적 모사(Dynamic simulation)란 대상 공정의 동특성 상태를 예측하고자 하는 방법론으로 초기에는 수치해석상의 어려움 때문에 문제 풀이 과정에서 많은 가정이 도입됨으로서 실용성 면에서 많은 한계를 가졌던 것도 사실이다. 그러나 컴퓨터 능력의 향상, 수치해석 기법의 발달 뿐 아니라 화학공정에 대한 이해의 폭과 깊이가 커짐에 따라 점차 실제공정에의 적용이 가능하게 되었다. 현재까지 시도되고 있는 상용 동적 모사 기술은 주로 상업용 프로그램에 의한 사용이 주를 이루는데 이러한 package의 장점은 in-house program에 비해 범용성에 있다고 할 것이다.

즉 실제 공장에서 가능한 이상 상태에 대해서 실험을 통하여 이러한 정량적인 데이터를 얻는다는 것이 불가능하므로 dynamic simulation을 이용하여 지식베이스에 적절히 활용될 수 있는 동특성 데이터를 얻기 위한 연구의 필요성이 대두되었다. 이에 본 연구에서는 우선 대상 공정에서의 특정 이상 사건 발생시의 동특성 데이터를 생성한 후 이를 사용하여 정성적인 정보로 변환되는 과정을 보여졌다. 본 연구에서는 이러한 일련의 연구를 위하여 우선 동적 모사 결과가 미치는 지식 베이스 구조에의 영향에 대해 살펴 보았다.

2. 화학 공장 이상 진단 방법론

현재까지의 공정에서는 이러한 공정 내에서의 이상 상태에 대한 판단을 조업자 및 alarm 시스템에 의해 수행되는 것이 보통이었다. 그러나 조업자에 의한 오동작 가능성 및 alarm system이 작동되는 시기는 이상 상태가 어느 정도 진행된 상황이라는 점을 고려하여, 이상 상태를 초기에 자동화된 방법론에 의해 찾아내는 것이 필요하게 되었다. 결국 이상 진단과 관련한 공정내에서의 활동에는 다음과 같은 네가지 활동이 서로 연결되어 이루어져야만 한다.

- monitoring
- diagnosis
- control
- supervision

이들 네 과정의 상관 관계에 대해 정리하면 다음과 같다.

(1) monitoring

공정내에 존재하는 조업 데이터를 주시하는 것이다. 이때 공정 제어 컴퓨터 시스템으로부터 들어오는 데이터를 단순히 주시할 뿐 아니라 이 데이터를 가공한 후 2차 정보를 생성한 후 이 데이터에 대한 주시까지 포함하게 된다. 이들 1차 정보 혹은 2차 정보들을 분석하기 위한 방법론은 특정 시간대의 데이터를 분석하는 방법, 하나의 변수에 대한 시간적 경과 과정을 분석하는 방법, 그룹 변수에 대한 시간적, 공간적 변화 동향을 분석하는 방법 등이 있다.

(2) diagnosis

diagnosis 단계는 앞서의 monitoring 단계로부터 특정 event의 발생을 알려주는 상황으로부터 개시된다. 그러나 diagnosis 단계를 계속하는 동안에도 계속적으로 조업 데이터가 들어오므로 이에 대한 효과적인 처리 방법론이 세워져 있는 것이 필요하다. 크게 두가지의 방법론이 존재한다.

- 첫번째 데이터 set을 분석하여 진단 결과를 얻을 때까지 계속적으로 들어온 데이터를 queue에 넣어 보관하는 경우
- 계속적으로 들어온 데이터를 앞서의 데이터와 연관 시켜 진단을 계속하는 경우

진단 시간이 sampling time보다 짧은 경우 첫번째 방법을 선택하게 되는데 이 경우 두번째 데이터 set을 받아 들인 후 앞서의 데이터 set과의 연결을 어떻게 할 것인가는 중요한 문제가 된다. 한편 이러한 분석법 중 대표적인 것으로 trend analysis를 들 수 있다.

trend analysis는 입력된 조업 정보를 분석하기 위한 방법 중 하나이다. 공정 데이터의 변화 경향을 분석하기 위한 방법은 크게 시간에 대한 변화 경향을 살펴보는 방법과 단일 시간대에 받아들인 데이터에 대한 패턴 분석을 수행하는 것 두가지로 대별되게 된다. 각각의 방법은 독특한 장점을 가지게 되는데 이에 대해 살펴보면 다음과 같다.

- 시간에 대한 변화 경향 분석

공정내의 한 장소에서 이상 상태가 발생하는 경우 이러한 영향에 의해 그 영향은 물질의 흐름, 제어기의 시호선 등을 타고 전파되게 된다. 그러므로 주변 상태의 변화 경향을 분석하게 되면 그러한 독특한 패턴에 의해 이상의 원인을 규명할 수 있게 된다. 그러나 점차 발달된 제어 기법 등이 도입됨에 따라 각 변수의 시간적 변화 경향 역시 분석에 포함시켜야 할 필요성이 증대되고 있다. 현재까지 이루어진 이러한 분석법은 위의 여러 방법론 중 일부를 택하고 있으나 관련 기술이 보다 축적되게 되면 이들 방법론의 결합이 필요하게 될 것이다.

(3) control

진단 결과 이상 상태의 원인 혹은 원인군을 발견한 경우 시스템은 이러한 상황을 조업자에게 알려주거나 혹은 스스로 적절한 action을 취하게 된다. 이러한 활동을 control이라 하는데(이 경우 기존의 control 개념과는 다른 광범위한 범위에서의 원하는 상태로 바로잡기 위한 control이다.) 다음과 같은 것이 있게 된다.

- 특정 장치에 대한 작동(stand-by operation)
- 조업자에게 알려주는 행위(원인, 시간, 예상 결과, 취할 행동 등)
- 자동 조업 중지(interlock system)

현재로서는 조업 담당자에게 알려주는 단계가 주를 이루나 조업자의 부재 등의 경우를 대비하여 일정 시간 혹은 상황의 진전에 따라 일정 기준을 넘어서는 경우는 이미 구성된 logic에 따라 스스로 작동하는 시스템에 대한 연구도 활발하다.

(4) supervision

supervision이란 조업중인 공정에 대해 현장 책임자가 수행하는 역할의 일부를 대신하는 경우를 일컫는데 조업 조건 변경(이상의 발생, 공정 상태의 변화), 생산 계획 변경 등 상위의 추상적인 의사 결정 단계를 포함하게 된다.

이러한 화학공정에서의 이상 진단(fault diagnosis) 과정은 안전성(safety) 및 경제성(economics) 향상을 위한 공정 관련 활동 중 중요한 과제이다. 기존의 공정에서는 이러한 과제를 조업 담당자의 의사 결정 과정에 의존하는 수동식으로 이루어졌으며, 이 경우 조업 담당자의 판단 착오, 피로, 자리 이탈 등의 경우 품질에 있어서의 이상, 긴급 조업 정치 등의 경우 뿐 아니라 중대 사고로까지 이어질 수 있는 가능성을 가지고 있었다.

초기에는 주로 alarm analysis 등을 중심으로 연구 개발 및 적용이 이루어졌으나, 축적된 공정 기술 및 발달된 컴퓨터 하드웨어 및 소프트웨어의 이용에 힘입어 점차 그 방법론이 정착 단계로 진행되고 있다. 현재 이상 진단 시스템 개발을 위해 가장 활발히 사용되고 있는 방법론은 전문가 시스템(knowledge-based expert system) 방법론이다.

70년대 후반부터 다른 분야(computer configuration, medical diagnosis, geographic data analysis)에서 조심스럽게 적용된 결과 실제 적용의 면에서 상당한 효과를 볼 수 있음이 밝혀지자 80년대에 들어오면서 다른 분야에서도 이러한 방법론의 활발한 적용이 시작되었다. 화학 공학 분야에서도 촉매 선택 시스템 등 prototype이 조심스럽게 개발되기 시작되었으며, 점차 그 적용 범위가 확대되고 있는 실정이다. 80년대 중반을 넘어서면서 이러한 방법론의 활용이 더욱 확대되었으며, 이 결과 최근에 이르러서는 한 회사(미국)에서 개발한 전문가 시스템의 수가 300개를 넘어설 정도로까지 확대되었다.

이렇게 전문가 시스템 사용이 확대되는 것은 기존의 engineering activity 중 상당한 부분이 수치 계산에 의한 것이기보다는 추상적인 기호화된 데이터에 바탕을 둔 의사 결정 과정이기 때문이다. 즉 engineering의 상당한 부분은 그 출발을 modelling에 두고 있는데 이러한 modelling이 정확한 수식만으로 나타내는데는 한계가 있기 때문이다. 그러므로 각 분야의 engineer들이 자신들의 추상적인 의사 결정 과정을 자동화 하고 싶은 바람을 실현 할 수 있는 전문가 시스템의 방법론의 사용에 깊은 관심과 노력을 기울이는 것은 당연하다 할 것이다.

아직까지는 국내에서의 이러한 전문가 시스템의 방법론의 사용이 초창기인 것은 그 근본적인 원인을 산업체의 여건에서 찾을 수 있다. 즉 국내의 대부분의 공정이 외국의 license에 의해 건설된 만큼 대상 공정의 핵심 부분에 대한 know-how의 결핍으로 인해 기본적인 modelling조차도 자체적으로 수행하는데 그 한계가 있는 점을 들 수 있다.

그러나 최근에 들어서서는 국내의 대형 회사 내에서 자체 공정에 대한 공정 최적화 및 고급 제어 방법론의 도입을 위해 공정 모사(steady or dynamic simulation)를 수행하고 있으며, 이러한 결과를 이용하여, 에너지 절감, 품질 향상, 경제성 향상 뿐 아니라 공정 개선(revamping)에 적용할 수 있게 되었다.

다. 최근에는 이러한 동적 모사 결과로부터 얻어진 정량적인 데이터로부터 지식 베이스 합성을 위한 연구도 조금씩 수행되고 있다.

한편 지식 모델에 대한 자동 합성은 점차 이상 진단을 위한 전문가 시스템의 개발이 성숙기로 다가감에 따라 이러한 과정 및 결과의 제품에 대한 일관성을 유지하고자 하는 목표를 달성하기 위한 자연스러운 결과라 본다. 즉 주어진 공정도 및 관련 데이터로부터 기본적인 이상 진단을 수행할 수 있는 지식 베이스의 자동 합성은 연구의 다음 단계로서 상당히 중요한 과제라고 볼 수 있다. 현재 이러한 이상 진단을 위한 지식 모델의 자동 합성에 대한 연구는 지난 5년 동안 전 세계적으로 몇몇 그룹에 의해 진행되고 있다. 본 연구에서는 이미 개발된 증상 트리 모델(symptom tree model) 및 이상 전파 유향 그래프(fault consequence digraph)의 자동 합성에 대한 연구 결과를 확장하고자 동적 모사 기술과의 연계를 수행하였다.

증상 트리는 공정상에서의 변화의 거동을 나타내기 위한 방법론 중 sensor 값 혹은 2차 가공 정보 중 변화가 생긴 것로부터 출발시켜 그 원인 혹은 원인군을 표시한 방법론이다. 즉 특정 측정값에서의 이상이 발생했을 때 그를 유발시킬 수 있는 고장 혹은 event의 list를 tree 구조로 나타낸 것이다. 이러한 증상 트리는 fault tree의 단점을 보완하면서 실제 공정에서의 진단 능력을 높이고자 개발된 방법론으로 그 역사는 80년대 초반으로 거슬러 올라간다.

YOON(1982)은 처음에는 symptom table을 사용하면서 직접적인 패턴 인식법을 적용하였다. 그러나 나타낼 수 있는 경우가 많아지게 되므로 보다 효율적인 방법을 찾게 되었다. 그 후 Han(1986), Kim(1989), Oh(1989), Nam(1991) 등에 의해 증상 트리의 여러 면이 검토되었다. HAN(1986)은 제어 능력 뿐 아니라 modelling에 있어서도 어려움이 있는 시멘트 공정에 대한 제어 및 이상 진단 문제를 풀기 위해 증상 트리를 사용하였다. 그는 먼저 이상 트리를 작성한 후 이 트리 내에 존재하는 측정 변수에 주목하여 증상 부트리를 작성하였다. 이러한 증상 부트리의 사용은 트리 모델의 정확성이 보장 받을 수 있는 경우 상당히 빠른 속도를 보장 받을 수 있게 된다. Nam(1991)은 앞서의 연구들이 증상 트리의 직접적 적용, 혹은 분석한 결과를 확장하여 증상 트리의 합성에 대한 연구를 수행하였다. 그는 증상 트리의 합성을 위해 mini fault tree 개념을 도입하였으며, 각 단위 공정에 대한 unit을 바탕으로 한 library를 구축하여 직접적인 합성을 시도하였다.

이상전파 유향 그래프(Fault-Consequence Digraph)는 이상 진단 시스템을 구축하는데 있어 증상 트리의 단점을 보완하기 위해 도입되었다. 즉 아직까지의 증상 트리만으로는 주어진 이상 정보로부터 정확한 원인 후보를 가려 낼 수 없음을 고려하여 역방향으로 정보를 처리한 FCD를 제안한 것이다. 한편 FCD에 대한 연구는 보다 최근에 이루어졌는데 최초의 적용은 Yoon(1989)에 의해 이루어졌으며 Oh(1989)에 의해 실제 시스템 구현을 위해 적용되었다. 그 후 Jeong(1991)은 FCD의 합성을 위한 qualitative simulation의 적용에 대해 검토하였다.

3. 동적 모사를 이용한 진단지식 생성

운전중인 공정은 다음중 어느 한 상태에 속하게 된다.

- 정상적인 조업 (그러나 점진적인 변화가 계속 진행되고 있다.)
- 이상 상태의 발생 (특정 장치의 고장 등)
- 다른 조업 모드로의 전이점 (decoking condition, 생산 방식의 변경)

또한 이러한 여러 조업 모드 중 이상 상태가 발전되는 과정은 크게 3단계로 나뉘어지게 된다.

- initiating phase
- developing phase
- fully developed phase

initiating phase는 특정 장치가 고장나거나, 센서가 이상 상태로 되는 등 최초로 이상 상태로 변하는 단계를 뜻하며, fully developed phase는 이상 발생 결과 더이상의 상태 변수 변화가 없는 충분한 시간이 지난 시점을 뜻하며, developing phase는 그 중간 과정으로 이상상태가 한창 전파되고 있는 단계를 뜻하게 된다. 그러므로 공정의 동특성을 활용하여 이상진단을 수행하고자 한다면 각 단계에서의 적합한 진단 전략이 고려되어야 할 것이다. 그러나 포괄적으로 보면 동적 모사를 이상 진단 시스템에 적용하는 단계는 다음과 같이 나눌 수 있다.

- 1) off-line knowledge-base generation
- 2) off-line knowledge-base verification
- 3) on-line knowledge-base generation and dignosis

이중 본 논문에서는 Jacketted CSTR에 대한 off-line knowledge -base generation에 대한 연구를 수행하였다. Fig. 1.에 본 연구의 대상 공정에 대한 그림이 나와 있다.

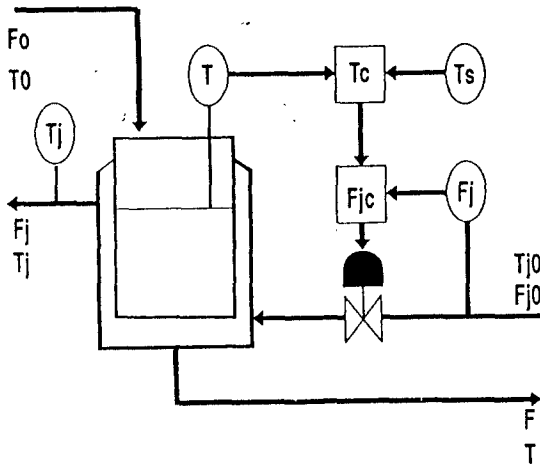


Fig. 1. Jacketted CSTR System

한편 Table 1.과 Table 2에 CSTR 내에 존재하는 이상 상태(fault)에 대한 list를 process fault와 sensor fault로 나누어 제시하였다.

Table 1. Process Faults in Jacketted CSTR System

1) NO FAULT
2) BLOCKAGE AT TANK OUTLET
3) BLOCKAGE IN JACKET
4) JACKET LEAK TO ENVIRONMENT
5) JACKET LEAK TO TANK
6) LEAK FROM PUMP
7) LOSS OF PUMP PRESSURE
8) JACKET EXCHANGE SURFACE FOULING
9) EXTERNAL HEAT SOURCE (SINK)
10) PRIMARY REACTION ACTIVATION ENERGY
11) SECONDARY REACTION ACTIVATION ENERGY
12) ABNORMAL FEED FLOWRATE
13) ABNORMAL FEED TEMPERATURE
14) ABNORMAL FEED CONCENTRATION
15) ABNORMAL COOLING WATER TEMPERATURE
16) ABNORMAL COOLING WATER PRESSURE
17) ABNORMAL JACKET EFFLUENT PRESSURE
18) ABNORMAL REACTOR EFFLUENT PRESSURE
19) ABNORMAL LEVEL CONTROLLER SETPOINT
20) ABNORMAL TEMPERATURE CONTROLLER SETPOINT
21) CONTROL VALVE (CV-1) STUCK
22) CONTROL VALVE (CV-2) STUCK

Table 2. Sensor Faults in Jacketted CSTR System

1) FEED_CONCENTRATION_SENSOR
2) FEED_FLOWRATE_SENSOR
3) FEED_TEMPERATURE_SENSOR
4) REACTOR_LEVEL_SENSOR
5) CONCENTRATION_A_SENSOR
6) CONCENTRATION_B_SENSOR
7) REACTOR_TEMPERATURE_SENSOR
8) COOLING_WATER_FLOWRATE_SENSOR
9) PRODUCT_FLOWRATE_SENSOR
10) COOLING_WATER_TEMPERATURE_SENSOR
11) COOLING_WATER_PRESSURE_SENSOR
12) LEVEL_CONTROLLER_OUTPUT_SIGNAL
13) CW_FLOW_CONTROLLER_OUTPUT_SIGNAL
14) COOLING_WATER_SETPOINT
15) INVENTORY_SETPOINT
16) CW_PRESSURE_DROP_CONSTRAINT
17) EFFL_PRESSURE_DROP_CONSTRAINT
18) MOL_BALANCE_CONSTRAINT

Fig. 2.는 이에 대한 SDG를 나타내었다.

이에 대해 Feed에서의 유속(Fig. 3.), 온도(Fig. 4.), 농도(Fig. 5.) 변화에 대한 동적 모사를 수행한 결과 그림이 Fig. 3, 4, 5에 나타나 있다. 이러한 결과를 Fig. 2.의 SDG와 비교하면 적절한 Gain 값의 선택에 의해 SDG 상의 정상적인 정보로 변환 될수 있음을 알수 있다. 현재의 동특성 그림에서는 두가지 변수에 대한 동특성 변화만 나타내었는데 SDG 상 과련을 맺을수 있는 몇가지 변수의 변화를 추가 시키면 보다 자세한 인과 관계를 나타낼수 있을 것이다.

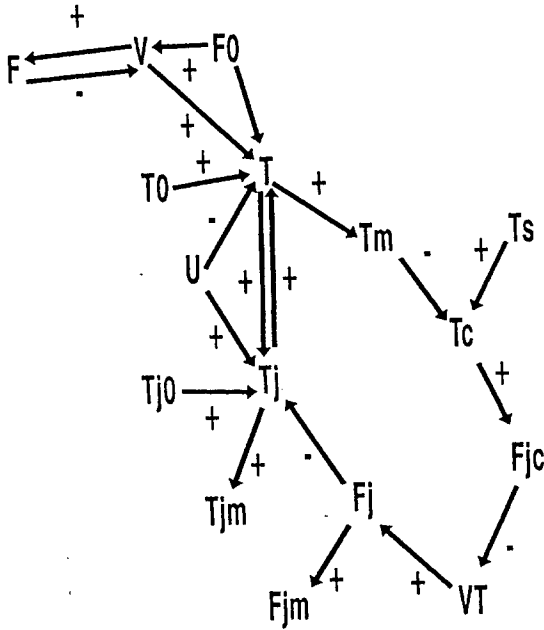


Fig. 2. SDG for Jacketted CSTR System

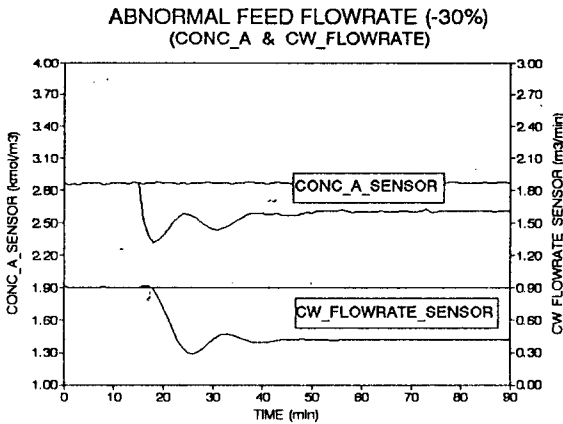


Fig. 3. Dynamic Simulation for Abnormal Feed Flowrate

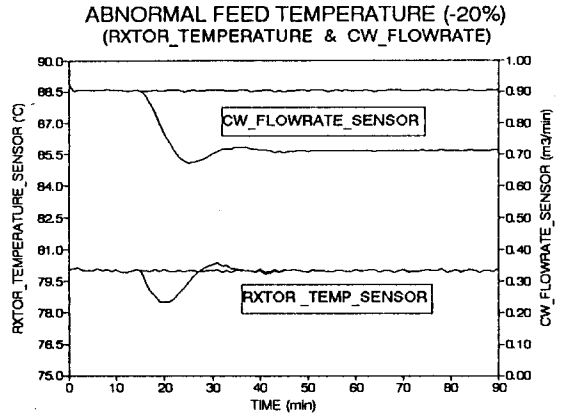


Fig. 4. Dynamic Simulation for Abnormal Feed Temperature

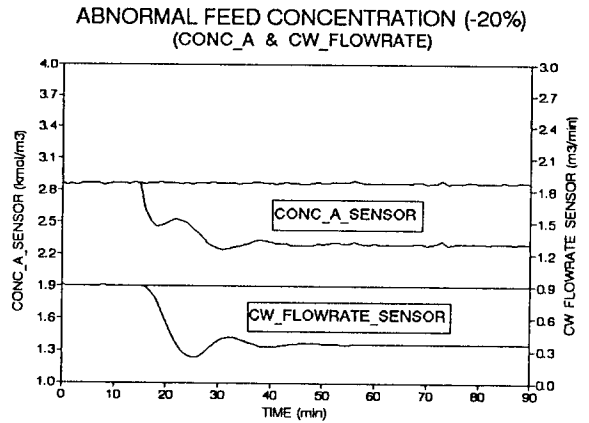


Fig. 5. Dynamic Simulation for Abnormal Feed Concentration

4. 결론

이상과 같이 CSTR에대한 이상 상태에대한 동특성 데이터로부터 지식 베이스를위해 사용될 수 있는 기호화된 정보를 생성하는 과정을 보였다. CSTR에서 나타날수 있는 대표적인 이상의 종류로 leaking, blocking, sensor failure 등에대한 지식 합성을 수행한 결과 적절한 결과를 얻을 수 있었다. 그러나 적당한 gain값의 선택, 공정 특성 변화에따른 adaptive 특성의 도입등 보다 많은 연구가 필요하다고 본다.

향후 연구 과제로는 본 접근 방법에대한 범용성을 제공하기 위하여 범용 simulator를 사용한 동특성 데이터 생성과 이의 on-line knowledge-base generation에대한 연구이다. 현재 이를위하여 범용 모사기인 Speedup과 범용 전문가 시스템 tool 인 G2와의 연결을위한 연구가 진행 중이다.

5. 참고 문헌

1. Cha, S.K., "A Study on Two-Stage Directed Graph model for Chemical Process Fault Diagnosis", Master Thesis, Seoul National University, (1993).
2. Chae, H.Y., Y.H. Yoon, and E.S. Yoon, "A Knowledge-Based Expert System for Hazard and Operability Studies", IFAC Workshop on Interactions between Process Design and Process Control, (1992).
3. Chang, C.C., and C.C. Yu, "On-Line Fault Diagnosis Using the Signed Directed Graph", *Ind. Eng. Chem. Res.*, 29, 1290 (1990)
4. Fussell, J.B., "Fault Tree Analysis-Concepts and Techniques", NATO Adv. Study Inst. on Generic Techniques in Systems Reliability Assessment, England (1973).
5. Iri, M., K. Aoki, E. O'Shima, and H. Matsuyama, "An Algorithm for Diagnosis of System Failure in the Chemical Process", *Comput. & Chem. Eng.*, 3, 489 (1979).
6. Kim, C.J., J.K. Oh, and E.S. Yoon, "A Diagnostic Expert System using the Symptom Tree Model", HWA HAK KONG HAK, 28 (1990).
7. Kramer, M.A., and B.L. Palowitch, "A Rule-Based Approach to Fault Diagnosis Using the Signed Directed Graph", *AIChE j.*, 33, 1067 (1987)
8. Kuiper, J.B., "Qualitative Simulation", *Artif. Intell.*, 29, 289 (1986).
9. Lapp, S.A., and G.J. Powers, "Computer-aided synthesis of fault trees", *IEEE Trans. Reliability*, R-26, 2 (1977).
10. Lees, F.P., "Process Computer Alarm and Disturbance Analysis : Review of the State of the Art", *Comput. & Chem. Eng.*, 7, 669 (1983).
11. Martin-Solis, G.A., P.K. Andow, and Lees, F.P., "Fault Tree Synthesis for Design and Real Time Applications", *Trans. Instn. Chem. Eng.*, 60, 14 (1982).
12. Oh, J.K., E.S. Yoon, and B.N. Choi, "A Real Time Operation Aiding Expert System using Symptom Tree and Fault Consequence Digraph", TKACC, p805, (1989).
13. Powers G.J., and F.C. Tompkins, "Fault Tree Synthesis for Chemical Processes", *AIChE J.*, 20, 376 (1974).
14. Shafaghi, A., Lees, F.P., Andow, P.K., "Fault Tree Synthesis Based on Control Loop Structure", *Chem. Eng. Res. Des.*, 62, 101 (1984).
15. Yoon, B.S., J.K. Oh, and E.S. Yoon, "Knowledge Base Representation for the Fault Diagnostic Expert System using the Fault Consequence-Digraph", HWA HAK KONG HAK, 29(1) (1991).
16. Han, J.H. and E.S. Yoon, "Process Failure Detection and Diagnosis using the Tree Model", IFAC Workshop on Fault Detection and Safety in Chemical Plants, Kyoto, 126(1986).
17. Yoon, Y.H., J.K. Oh, E.S. Yoon, and S.W. Park, "On-Line Fault Diagnosis System for Naphtha Furnaces", 4th International Symposium on Process Systems Engineering, Vol. II -24, Québec, (1991).