

역할-거동 모델링에 기반한 화학공정 이상 진단을 위한 이상-인과 그래프 모델의 합성

Synthesis of the Fault-Causality Graph Model for Fault Diagnosis in Chemical Processes Based On Role-Behavior Modeling

이 동 언, 어 수 영, 윤 인 섭*

(Dong Eon Lee, Soo Young Eo, and En Sup Yoon)

Abstract : In this research, the automatic synthesis of knowledge models is proposed, which are the basis of the methods using qualitative models adapted widely in fault diagnosis and hazard evaluation of chemical processes. To provide an easy and fast way to construct accurate causal model of the target process, the Role-Behavior modeling method is developed to represent the knowledge of modularized process units. In this modeling method, Fault-Behavior model and Structure-Role model present the relationship of the internal behaviors and faults in the process units and the relationship between process units respectively. Through the multiple modeling techniques, the knowledge is separated into what is independent of process and dependent on process to provide the extensibility and portability in model building, and possibility in the automatic synthesis. By taking advantage of the Role-Behavior Model, an algorithm is proposed to synthesize the plant-wide causal model, Fault-Causality Graph (FCG) from specific Fault-Behavior models of the each unit process, which are derived from generic Fault-Behavior models and Structure-Role model. To validate the proposed modeling method and algorithm, a system for building FCG model is developed on G2, an expert system development tool. Case study such as CSTR with recycle using the developed system showed that the proposed method and algorithm were remarkably effective in synthesizing the causal knowledge models for diagnosis of chemical processes.

Keywords : role-behavior modeling, fault-behavior model, structure-role model, fault-causality graph, qualitative model, fault diagnosis

I. 서론

화학공정의 안전을 향상시키기 위한 수많은 노력들은 주로 온라인상으로 진행되는 이상진단과 오프라인으로 수행되는 위험성 분석의 두 가지 분야로 진행되어 왔다. 이 두 분야에서 필요한 것은 원인을 추적하기 위해 사용되는 추론 모델이며 그 중 정성적 모델은 사람과 유사한 방법으로 추론할 수 있는 방법을 제공하여 왔다. 정성적 모델을 구축하는 방법은 많은 경우에 있어서 전문가에 의한 수작업을 통하여 이루어져 왔으나 공정이 대형화 되고 고려해야 할 노드와 간선의 수가 기하급수적으로 늘어남에 따라 정성적 모델을 구축하는 것은 아주 어려운 일이 되고 있다. 또한, 개발 과정이 복잡해짐에 따라 구축된 모델에 수많은 오류가 생길 수 있으며 이러한 오류가 존재하는 모델을 사용한 이상진단이나 위험성 평가방법으로서서는 원하는 결과를 얻지 못하게 된다. 본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고 화학공정 이상진단 분야에서 널리 사용되는 정성적 모델을 이용한 방법의 근본이 되는 지식 모델의 합성을 자동화하고자 하였다. 이를 위해 이해하기 쉽고 빠른 시간 내에 대상 공정의 정확한 인과 모델을 구축할 수 있도록 각 단위 공정

장치별로 모듈화한 지식을 표현할 수 있는 역할-거동 모델 표현방법을 개발하였다. 역할-거동 모델을 이용하여 각각의 단위 장치에 해당하는 이상-거동 모델을 구성하게 되며, 각각의 단위 장치별 모델로부터 공정 전체의 인과 모델인 이상-인과 그래프를 자동화된 방법으로 합성할 수 있도록 그 알고리즘을 개발하였고 이를 전문가 시스템 개발 도구인 G2를 통하여 시스템으로 구현하였다. 구현된 시스템을 이용하여 CSTR 공정에 대해 사례 연구를 수행함으로써 제안된 방법이 진단에 필요한 공정 인과 지식 모델을 효율적으로 합성할 수 있음을 보였다.

II. 역할-거동 모델링 (Role-Behavior Modeling)

본 연구에서 제안하는 모델링 방법으로서 단위 장치가 어떤 공정에 사용되고 어떠한 조건에서 운전되는지에 관계없이 항상 성립하는 내용만으로 구성된 기본 지식 (general knowledge) 모델 부분과 그 장치가 사용되는 특정 공정 내 조건에 따라 달라지는 고유 지식 (specific knowledge) 모델 부분으로 나누어져 있고 이를 이용하여 해당 되는 장치에 따른 공정별 이상-거동 모델을 합성하는 방법으로 이를 역할-거동 모델링이라고 한다. 그리고 역할-거동 모델링에 의해 생성된 모델을 이용하여 이상-인과 그래프라고 하는 전체 공정의 인과 모델을 합성하는 알고리즘을 제안하고자 한다. 역할-거동 모델을 구성하는 모델은 기본 이상-거동 모델(generic fault-behavior model), 구조-역할 모델 (structure-role model), 반응 및 분리 모델 (reaction & separation model), 특정 이상-거동 모델 (specific fault-behavior

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 9. 8., 채택확정 : 2004. 1. 12.

이동언 : 서울대학교 응용화학부(dongeon@pslab.snu.ac.kr)

어수영 : (주) LG화학 기술연구원(esyoung@lgchem.com)

윤인섭 : 서울대학교 응용화학부(esyoon@pslab.snu.ac.kr)

※ 본 논문은 BK21사업에서 지원하여 연구하였음.

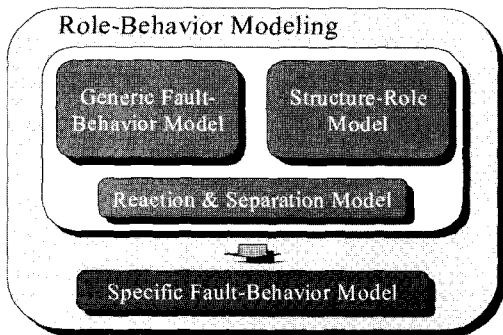


그림 1. 역할-거동 모델링.
Fig. 1. Schematic of Role-Behavior Modeling.

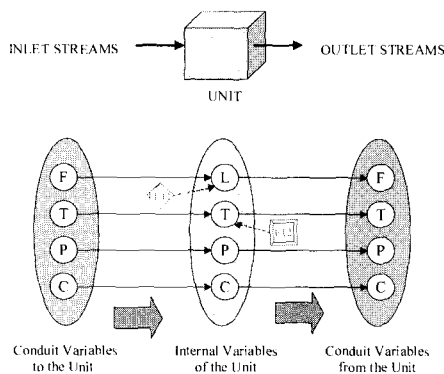


그림 2. 이상-거동 모델.
Fig. 2. Schematic of Fault-Behavior model.

model)의 네 부분으로 나누어져 있고 이 중 기본 이상-거동 모델이 공정과는 무관한 (process independent; context independent) 모델이 되며 나머지는 공정 의존적인 (process dependent; context dependent) 정보를 담고 있는 모델이 된다. 여기서 specific 이상-거동 모델은 다른 세 가지 모델로부터 각 장치 별로 합성되는 모델이다. 이 관계를 다음의 그림 1에 나타내었다.

역할-거동 모델링에서 사용되는 용어를 먼저 간단히 정의하고 모델링 방법에 대한 설명을 하도록 하자.

스트림 (stream) : 공정 내에서 흐름이 일어나는 물질을 나타내며 포함하고 있는 내용에 따라 물질 스트림 (material stream), 유틸리티 스트림 (utility stream), 신호 스트림 (signal stream)으로 나눌 수 있다. 물질 스트림은 해당 공정이 목표로 하는 생성물을 생산하기 위한 원료나 중간물질들이 흐르는 스트림을 나타낸다. 유틸리티 스트림은 공정에 필요한 냉각수나 스팀 등 주로 열 교환을 목적으로 하는 스트림을 나타낸다. 그리고 신호 스트림은 센서 측정값이나 제어기 신호 등을 표현하기 위한 전기적, 유압적 신호 스트림을 나타낸다. 이러한 스트림은 뒤에 나올 구조-역할 모델에서 각 장치들 사이의 연결 관계를 나타낼 때 사용되며 장치 거동 모델의 구성에서 그 장치로의 입력과 출력 스트림을 나타낼 때 사용된다. 그리고 물질 스트림과 유틸리티 스트림을 총칭하여 공정 스트림이라고 한다.

이상-거동 모델 (fault-behavior model) : 단위 공정 장치로 들어오고 나가는 스트림을 기준으로 장치 내에 존재하는 변수들 간의 관계와 변수의 변이를 야기할 수 있는 이상 (fault)과의 관

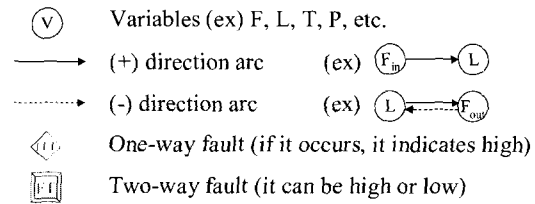


그림 3. 이상-거동 모델에 사용되는 기호.
Fig. 3. Description of symbols in faults-behavior models.

계를 부호 유향 그래프로 나타낸 모델이다.
장치별 기본 이상-거동 모델 (generic fault-behavior model of units) : 각 공정 장치별로 만들어진 일반적인 입출력 변수간의 이상-거동 모델을 뜻한다.

장치별 specific 이상-거동 모델 (specific fault-behavior model of units) : 장치별 기본 이상-거동 모델과 그 장치의 역할, 그리고 그 장치에 영향을 주는 장치 (주로 입력 측에 연결되는 장치)의 역할을 바탕으로 생성된 공정 specific한 이상-거동 모델이다.

반응 모델 (reaction model) : 해당 공정 내에서 사용되는 반응을 정의 한 것으로서 장치로 입력되는 물질 스트림이 온도, 압력 그리고 각 요소에 주는 영향을 이상-거동 모델 형식으로 나타낸 것이다. 앞의 장치별 이상-거동 모델과의 차이점은 입력 스트림과 장치내의 온도, 압력, 그리고 각 성분과의 관계만을 나타내는 것으로 출력 스트림은 존재하지 않는다는 것이다.

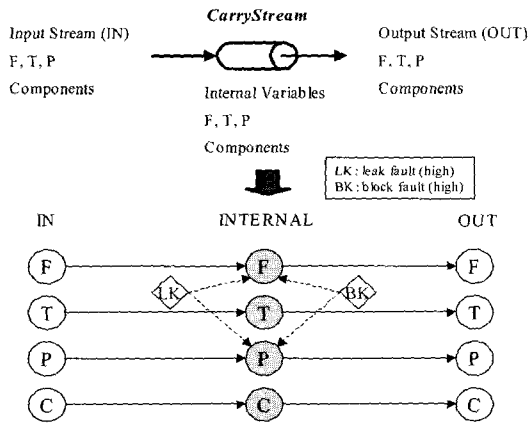
분리 모델 (separation model) : 해당 공정 내에서 일어나는 상 (phase)별 성분 분리를 정의한 것으로서 장치 내의 온도와 압력의 변화가 기상과 액상측 스트림의 성분 변화에 미치는 영향을 표현한 것이다. 이 모델은 반응 모델과는 달리 장치내의 온도, 압력 변화가 출력 스트림측에 미치는 영향을 나타내므로 입력 스트림은 존재하지 않는다는 것이다.

장치 역할 (role) : 이상-거동 모델이 공정 변수의 관점에서 상호간의 관계를 나타낸다면 장치 역할이라 함은 한 단계 위인 장치적인 측면에서 바라본 해당 장치의 기능을 뜻하게 된다. 해당 장치가 영향을 주는 장치에 대한 역할을 나타낸 것으로서 예를 들면 파이프의 FeedReactant (Comp_A), FeedLowTemp 등의 역할이 있다.

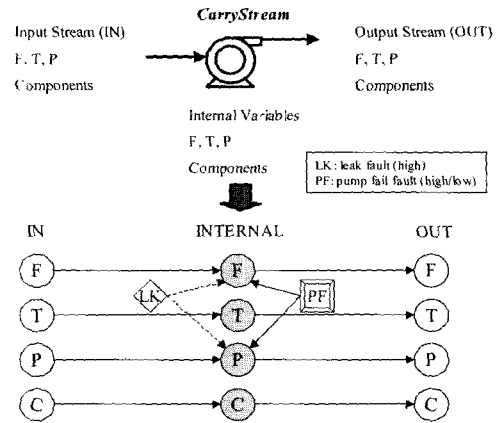
기본 장치 역할 (default role of a equipment) : 그 장치가 어디에 쓰이는 지에 관계없이 항상 수행하게 되는 역할을 뜻한다. 예를 들면 파이프는 항상 CarryStream이라는 역할을 수행한다.

III. 공정 장치별 기본 이상-거동 모델 (Generic Fault-Behavior model for process unit)

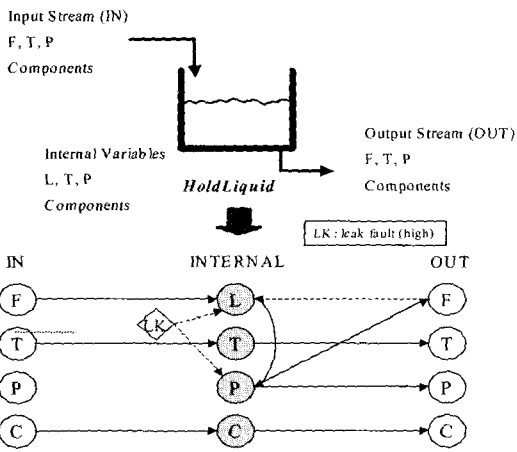
이상-거동 모델은 기본적으로 어떤 공정 장치가 있을 때 그 공정으로 들어가는 입력 스트림, 그 공정을 지나 나오는 출력 스트림, 그리고 그 공정 내부 변수 (internal variables) 간의 관계와 그 장치에서 발생할 수 있는 이상과의 관계를 부호 유향 그래프로 나타낸 것이다. 이상-거동 모델의 개념과 사용되는 기호의 설명을 그림 2와 그림 3에 나타내었다. 이상-거동 모델은 정상상태 (steady-state)에서 입력 스트림의 변수가 변화 할 때 그 변화가 장치의 내부 변수에 어떤 변화를 일으키는 지, 그리고 그 내부 변수의 변화가 다른 내부 변수나 출력 스트림의 변수에 어



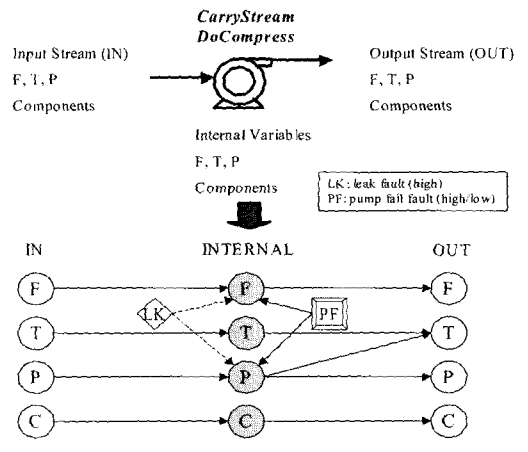
(a) 파이프



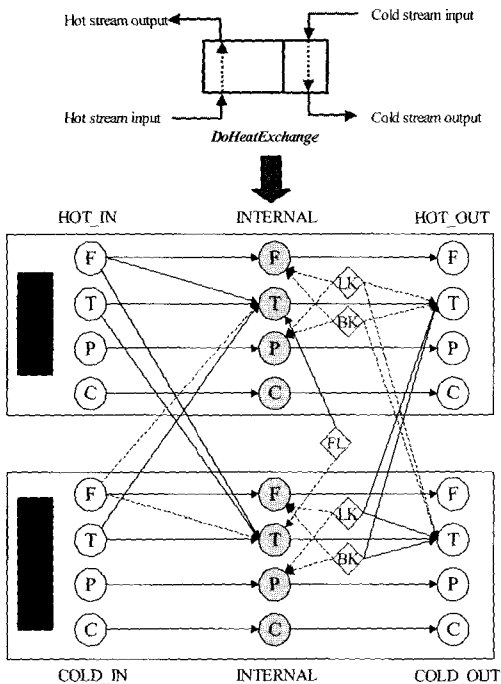
(d) 펌프



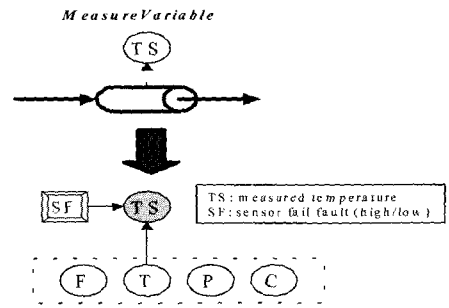
(b) 탱크



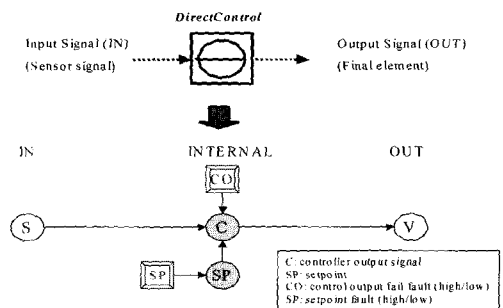
(e) 압축기



(c) 열교환기



(f) 센서



(h) 제어기

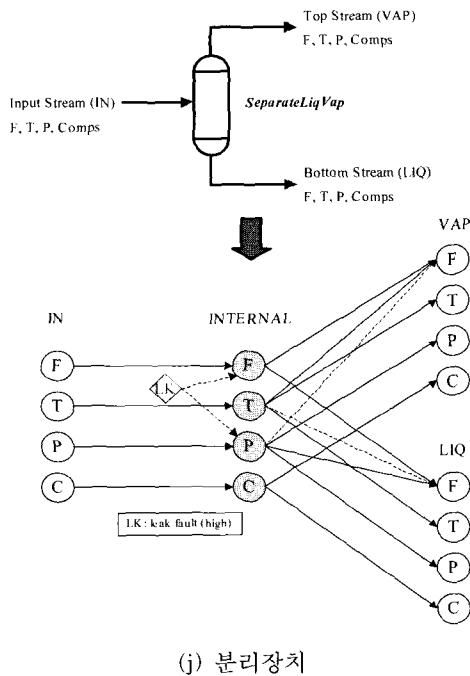
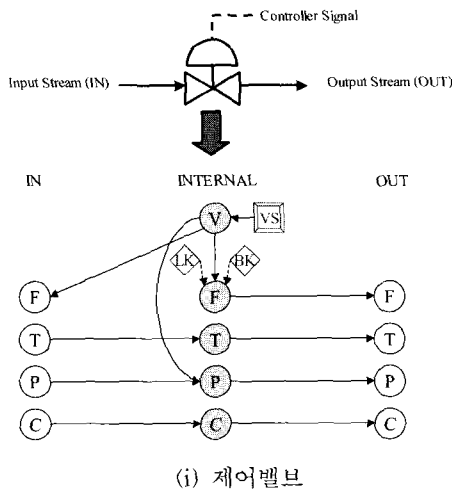


그림 4. 공정 장치별 기본 이상-거동 모델.

Fig. 4. Generic fault-behavior model for process unit.

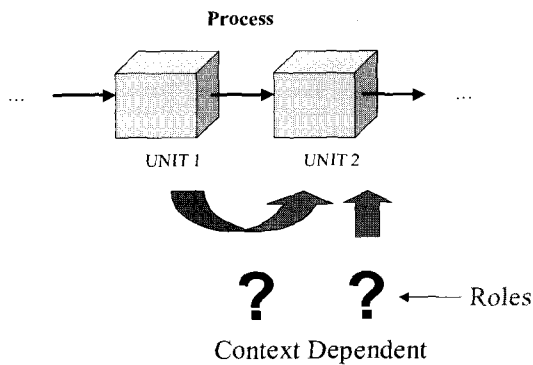


그림 5. 구조-역할 모델.

Fig. 5. Schematic of structure-role model.

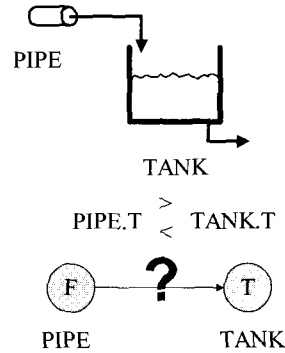


그림 6. 파이프와 탱크의 관계에서 파이프의 유량과 탱크의 온도와의 관계를 나타내는 간선의 부호.

Fig. 6. The sign of arc between PIPE.F and TANK.T depends on the temperature relationship between pipe and tank(process specific knowledge).

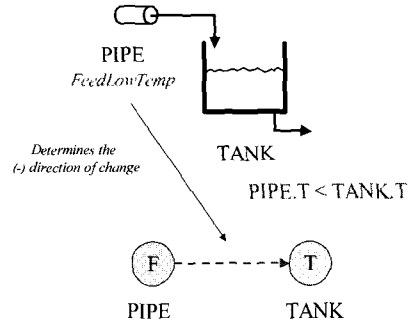


그림 7. 파이프의 유량과 탱크의 온도와의 관계에서 FeedLowTemp라는 역할을 부여하여 생성되는 간선의 부호.

Fig. 7. The sign of arc between PIPE.F and TANK.T can be designated by assigning a role FeedLowTemp to the pipe.

변화를 일으키는지를 나타내는 것이다. 따라서 기본적으로 정상 상태에서의 변화가 미치는 영향만을 고려한다고 가정하는 것이다. 이와 마찬가지로 정상 상태에서 이상이 발생하면 그 이상이 여러 변수들에 어떤 변화를 일으키는지를 나타낸다. 일반적으로 화학공정에서 자주 사용되는 공정 장치(파이프, 탱크, 열교환기, 펌프, 압축기, 센서, 제어기, 제어밸브, 분리장치)들에 대한 기본 이상-거동 모델은 다음의 그림 4와 같다.

IV. 장치별 구조-역할 모델(Structural-Role model)

구조-역할 모델에서 구조란 대상이 되는 공정에서 각 장치들이 어떻게 서로 연결되어 있는 가를 나타내는 것이다. 이는 공정의 흐름도(flowsheet)과 유사하며 공정에 존재하는 장치들을 앞서 설명한 공정 스트림(물질 스트림, 유틸리티 스트림)과 신호 스트림들을 사용하여 서로의 연결관계를 표현한다. 역할이란 서로 연결된 장치들 간에 그 장치가 다른 장치에 어떠한 기능을 수행하는지 혹은 그 장치의 기본적인 기능(기본 이상-거동 모델에서 표현) 이외에 또 어떠한 기능을 수행하는지 등 공정 의존적인 기능들을 나타내기 위한 것이다. 이를 그림 5에 나타내었다.

다음의 그림 6과 같이 파이프와 탱크로 이루어진 공정을 생

각해보자. 앞서 설명한 기본 이상-거동 모델로는 파이프의 유량(앞으로PIPE.F 라고 표시)과 탱크의 온도 (TANK.T) 사이에 어떠한 관계가 존재하는지 설명하지 못한다. 만일 PIPE의 온도 (PIPE.T)가 TANK.T보다 크다면 PIPE.F의 증가가TANK.T의 증가를 일으킬 것이고 (+방향 같은 방향의 변화) 만일 PIPE.T가 TANK.T보다 작다면 PIPE.F의 증가가 TANK.T의 감소를 일으키게 되므로 이는 공정의 운전 상태에 의존 즉, 공정에 의존적인 지식이다. 만일 파이프 내의 유체 온도가 탱크의 온도보다 낮은 상태로 탱크로 공급되는 공정이라면 이러한 공정 의존적인 지식을 다음의 그림 7과 같이 파이프가 탱크에 하는 역할인 **FeedLowTemp**를 부여하는 방법으로 표현할 수 있다.

이러한 역할의 종류로는 앞서 이야기한 기본 이상-거동 모델에서 사용되는 기본 역할과 공정 의존적인 기능을 나타낼 수 있는 역할이 있다. 기본 역할은 공정 독립적이므로 여기서는 큰 의미가 없으며 구조-역할 모델에서 의미가 있는 공정 의존적인 역할은 접두어에 따라 Feed/Do/Dominant로 분류되고 이외에 열교환기로 들어가는 hot 스트림과 cold 스트림을 구분하기 위한 역할인 hot-stream/cold-stream이 있다.

Feed 접두어는 그 역할이 사용된 장치의 해당 변수가 바로 뒤에 연결된 장치에 주는 영향을 나타낸다. **Feed** 뒤에는 **High/Low**와 같은 상태를 나타내는 단어와 바로 그 뒤에는 **Temp/Reactant**와 같은 그 상태를 가지는 특성이 붙는다. 만일 **Reactant**와 같은 구성요소와 연관된 특성이 사용될 때에는 그 뒤에 **parameter list**가 추가된다.

<Syntax> Feed + High/Low + attribute + [(component)]

예를 들어 앞의 예에서와 같이 파이프의 온도가 그 뒤에 연결된 탱크보다 낮은 온도로 공급된다는 것을 지정할 필요가 있을 때 파이프에 **FeedLowTemp**와 같이 온도가 낮다는 것을 지정하는 역할을 사용하며, 그유체의 성분 중 반응물인 A의 농도가 탱크의 농도보다 높은 상태로 공급된다면 **FeedHighReactant(CA)**라는 역할을 이용하여 A가반응물이며 그 농도가 뒤에 연결된 장치내의 A 농도보다 높다는 사실을 알려주게 된다.

Do 접두어는 반응이나 분리처럼 그 장치 자신에서 이루어지는 기능을 나타내고자 할 때 사용된다.

<Syntax> Do + Reaction/Separation + (reaction-or-separation-set-name)

예를 들어 탱크에서 rxn-1이라는 반응이 일어난다고 하면 **DoReaction(rxn-1)**이라는 역할을 그 반응이 존재하는 탱크에 지정한다. 여기서 rxn-1이라는 것은 반응 모델의 이름을 뜻하게 된다. 반응 모델과 분리 모델은 추후에 설명된다.

Dominant접두어는 뒤에 공정 인과 그래프의 합성에서 다루게 될 변수간의 영향이 상충 (path conflict) 될 때 이를 해결하기 위해 사용하는 역할로서 여러 영향 중 어느 것이 **dominant**한 영향인지를 지정할 때 사용한다. 주로 **DoReaction()**이나 **DoSeparation()** 역할이 지정된 장치에서 사용된다.

<Syntax> Dominant + [Reaction/Separation] + (unit-name, variable)

반응이나 분리 모델의 역할에 의해 두 노드간에 서로 다른 부호의 간선이 존재하게 되는 경우에 **feed**에 의한 영향과 반응/분리에 의한 영향 중 어느 쪽이 더 우세한지를 지정하고자 할 때 사용한다. 예를 들어 파이프의 유량이 현 장치의 상태변수에 미치는 영향이 이 장치에서 존재하는 반응에 의한 영향보다 더 우

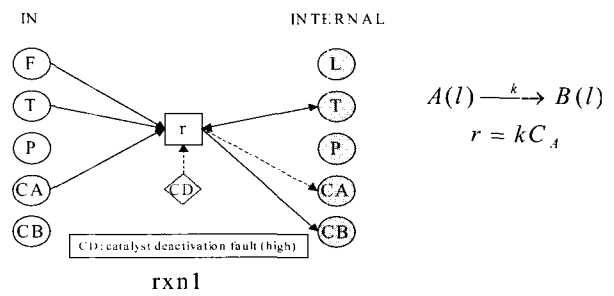


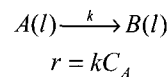
그림 8. 반응기내에서 1차 비가역 발열반응의 예.
Fig. 8. Example of 1st order irreversible exothermic reaction in a tank.

세할 때 **Dominant(pipe-l.flow)**와 같은 역할을 지정할 수가 있다 (**feed**에 의한 영향은 **feed**라는 word를 생략).

V. 반응 및 분리 모델 (Reaction & Separate model)

반응 모델은 해당 공정 내에서 사용되는 반응을 정의한 것으로서 장치로 입력되는 물질 스트림이 가상 변수로 표현되는 반응 **r**에 미치는 영향과 이 반응으로 인해 해당 장치내의 온도, 압력 그리고 각 성분에 주는 영향을 이상-거동 모델 형식으로 나타낸 것이다. 앞의 장치별 이상-거동 모델과의 차이점은 입력 스트림, 가상 변수 **r**, 그리고 장치내의 온도, 압력, 그리고 각 성분과의 관계만을 나타내는 것으로 출력 스트림은 존재하지 않는다는 것이다. 여기서 **가상 변수 (virtual variables)**는 물리적인 값을 나타내는 변수가 아닌 가상적으로 존재하는 변수를 나타내기 위해 사용되는 변수로서 반응 속도 등이 이에 해당된다.

예를 들어 다음과 같은 1차 비가역 발열 반응이 있다고 하자.



1차 비가역 발열이므로 입력 스트림의 유량, 온도, 반응물 A의 농도 증가는 반응을 증가시킨다. 그리고 증가된 반응은 장치 내부의 온도와 생성물 B의 농도를 증가시키게 되고 반응물 A의 농도는 감소시킨다. 또한 반응으로 생성된 열에 의해 장치내의 온도가 증가하게 되면 이 온도 상승은 또한 반응을 더욱 상승시키는 영향을 주게 된다. 만일 그 장치에서 촉매의 비활성화 (이상)가 일어나면 그 이상으로 인해 반응을 감소시키게 될 것이다. 이러한 반응이 탱크와 같은 CSTR에서 일어난다고 하면 그림 8과 같은 반응 모델을 작성할 수 있다.

VI. 공정 이상-인과 그래프의 합성 (Synthesis of Fault-Causal Graph from Specific Fault-Behavior model)

앞에서 설명한 역할-거동 모델링을 이용하여 장치별 기본 이상-거동 모델, 반응 및 분리 모델, 그리고 구조-역할 모델로부터 공정 specific 이상-거동 모델을 구하고 이와 같은 방법으로 얻을 수 없는 장치에 대한 공정 specific 이상-거동 모델을 작성하게 되면 이제 그 공정 전체의 이상-인과 그래프를 합성할 수 있게 된다.

최종적으로 만들어지게 되는 그래프는 센서가 달려있는 변수 즉, 측정되는 변수와 그 측정값, 제어기 신호, 이상, 그리고 병합하기 힘든 미측정 변수 노드만으로 이루어진 그래프를 얻

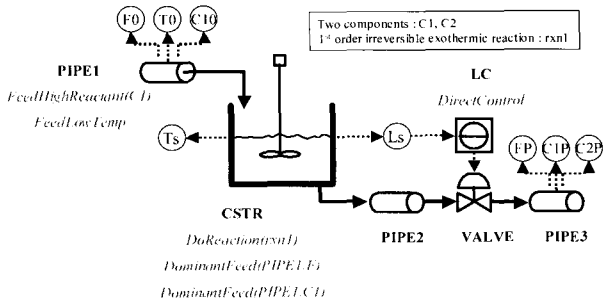


그림 9. 재순환이 없는 CSTR 공정 예제.
Fig. 9. Example-CSTR process with no recycle.

게 된다. 여기서 병합하기 힘든 노드라 함은 그 노드가 사라지면 다른 노드간의 부호 constraint가 없어지거나 거짓 pathway가 생기는 노드를 말한다. 이에 대해서는 Kramer and Palowitch (1987)가 언급하였으며 뒤에 설명할 병합 단계에서 자세히 이야기하도록 하겠다.

공정전체의 인과 관계를 나타내는 이상-인과 그래프는 세 가지의 단계를 거쳐서 완성된다. 첫번째는 연결 단계 (connection stage)로 장치별 specific 이상-거동 모델을 구조-역할 모델을 이용하여 서로 연결하는 단계이다. 두 번째는 제거 단계 (removal stage)로 반응 등이 있을 때 만들어진 가상 변수를 제거하고 영향을 주지 못하거나 그 영향을 측정할 수 없는 내부 변수를 제거하는 단계이다. 마지막으로 병합 단계 (mergence stage)로 제거 단계에서 없어지지 않은 미측정 변수를 측정 가능한 변수에 병합하는 단계이다. 두 번째와 세 번째 단계를 합하여 미측정 변수의 제거 (unmeasured variable elimination) 단계라고 부르기도 한다.

VII. 예제(재순환이 없는 CSTR 공정)

이 공정은 Kramer and Palowitch (1987)가 이상진단 방법론을 검증하기 위하여 사례 연구로 사용한 것을 간략화 한 것으로 이 공정은 그림 9의 구조-역할 모델에서 볼 수 있듯이 반응기 (CSTR), 제어기(controller), 밸브(control valve), 파이프(pipe)로 구성된 반응기 시스템으로 반응물 A로부터 생성물 B로의 1차 비가역반응이 일어난다. 이 공정은 한 개의 feedback 제어루프가 있는데 사용되는 제어기는 PI제어기이다. 제어기는 반응기의 액위를 제어한다. 반응기의 액위 제어는 순방향(direct)이다. 총 센서의 개수는 8개이고 제어기 출력 값 1개를 포함하면 측정 가능한 변수의 수는 모두 9이다.

1. 연결 단계(Connection stage)

이 단계에서는 공정 specific 이상-거동 모델과 구조 모델만을 사용하며 다음과 같은 순서를 따라 합성된다.

- 1) 공정 스트림의 흐름을 따라 장치별 내부 변수들을 연결하게 된다.
- 2) 유틸리티 스트림의 흐름에 따라 연결한다.
- 3) 센서의 처리와 제어기 관련 신호의 흐름에 따라 연결한다.

그 결과는 다음의 그림 10과 같다.

2. 제거단계(Removal stage)

먼저 반응 속도를 나타내는 가상 변수 r을 제거한다. 가상 변

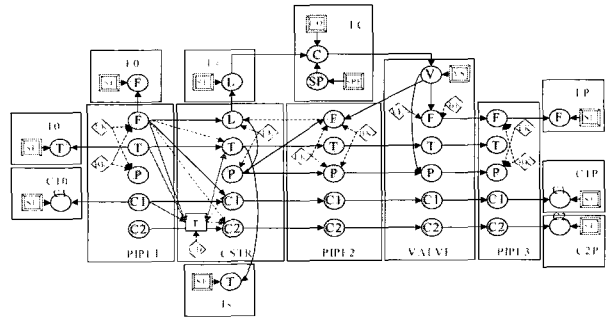


그림 10. 연결단계에서의 Fault-Causal graph.
Fig. 10. Fault-Causal graph when the connection stage completed.

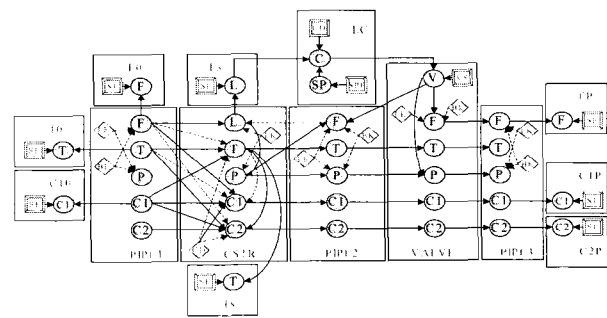


그림 11. 가상 변수의 제거.
Fig. 11. Virtual variable is eliminated.

수 r로 입력 되는 모든 노드를 가상 변수 r에서 출력되는 노드에 연결한다. CSTR.T에서 다시 자신으로 연결되는 간선은 제외한다. 가상 변수 r의 제거 과정에서 <PIPE1.F (-) CSTR.T>인 (-) 방향의 간선이 이미 존재하는 상황에서 <PIPE1.F (+) CSTR.T>인 간선, 즉 <PIPE1.F (+) CSTR.T>인 간선을 추가해야 하는 상황이 발생한다. 이것은 낮은 온도의 피드를 공급함에 따른 온도의 (-) 방향 변화와 반응에 의한 온도의 (+)방향 변화 두 가지의 반대되는 변화가 존재함을 의미한다. PIPE1.F에서 CSTR.C1, CSTR.C2로 연결되는 간선 또한 마찬가지이다. 이는 낮은 온도의 feed에 의한 영향이 지배적인지 아니면 반응에 의한 온도 변화가 지배적인지에 따라 PIPE1.F가 온도와 성분의 조성의 변화에 미치는 방향이 결정된다는 것을 의미한다. PIPE1.F에서 CSTR.T로의 가상 변수 r을 제거한 결과를 다음의 그림 11에 나타내었다.

두 번째로는 다른 내부 변수로 영향을 주지 못하거나 영향을 주더라도 측정이 불가능한 내부 변수를 정 방향으로 제거하는 단계이다. 이들을 제거하기 위해서는 다른 IV(internal variable)나 SV(signal variable)로부터의 진입간선이 없는 IV중, (1) 진출간선이 없거나 (2) SV로의 진출 간선이 없고 측정변수 (SV로의 진출간선)가 아니거나 FT(fault)로부터의 진입간선이 없는 IV를 제거한다. 이때 노드를 제거하고 필요 없어지는 간선을 제거하면 또다시 같은 검색을 시작하여 더 이상 이 조건에 맞는 IV가 없을 때 까지 계속한다. 두 번째 단계에 해당하는 변수로는 PIPE1.P와 PIPE1.C2가 된다. PIPE1.P를 제거할 때는 PIPE1.LK와 PIPE1.BK에서 그 노드로 진입하는 간선도 제거한다. 마찬가지로 PIPE1.C2에서 CSTR.C2로 연결되는 간선도 제거한다.

세 번째로 다른 내부 변수로 영향을 주지 못하거나 영향을 주

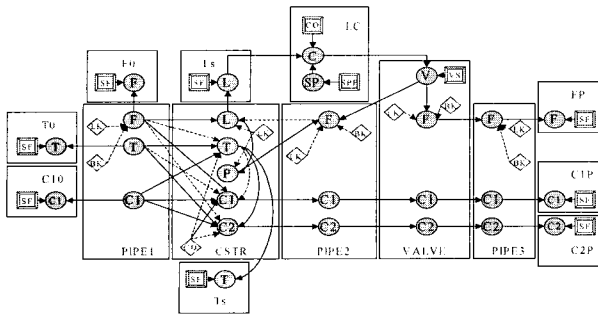


그림 12. 제거 단계에서의 Fault-Causal graph.
Fig. 12. Fault-Causal graph when removal stage finished.

더라고 측정이 불가능한 내부 변수를 역 방향으로 제거하는 단계이다. 이 단계에서는 진출 간선이 없는 IV중 valve-position으로부터의 입력이 없거나 자신이 유량(flow) IV가 아니면 제거해 나간다. 더 이상 진출 간선이 없는 IV가 없을 때 까지 계속한다. 세 번째 단계에 해당하는 변수로는 PIPE3.T, VALVE.T, PIPE2.T가 차례로 삭제되고 마찬가지로 PIPE3.P, VALVE.P, PIPE2.P가 삭제된다.

여기 세부 단계들을 거치면서 일단 제거 단계가 끝나게 된다. 여기까지의 결과를 그림 12에 나타내었다.

3. 병합단계(Mergence stage)

이제는 미측정 변수들을 측정변수에 병합하는 단계를 수행할 때이다. 먼저, 역방향 단순 병합을 실시하게 된다. 일단 시작 포인트가 되는 모든 MV(measured variable)를 검색하여 리스트 L에 저장하게 되면 L은 다음과 같은 총 8개의 노드들을 담게 된다.

$$L = \{ \text{PIPE1.F, PIPE1.T, PIPE1.C1, CSTR.L, CSTR.T, PIPE3.F, PIPE3.C1, PIPE3.C2} \}$$

리스트 L에 저장된 순서대로 그 MV로 진입하는 다른 IV를 탐색하여 그 IV가 제어밸브의 V변수이면 V와 같이 합친 후 V에서 나누어진 다른 F와도 같이 병합해나간다. 이 때 VS (valve stuck fault)는 Flow MV에 붙게 된다. 제어 밸브가 아니고 그 IV에 또 다른 IV로의 진출 간선이 있으면 그 IV를 노드 리스트 NL에 저장한다. 그렇지 않고 또 다른 IV로의 진출 간선이 없으면 MV와 병합한다. 이것은 더 이상 탐색할 IV가 없거나 다른 MV를 만날 때 까지 계속된다. PIPE1의 F, T, C1에는 진입간선이 없으므로 병합이 일어나지 않는다. CSTR.L의 진입간선에는 PIPE2.F가 있고 PIPE2.F에서 다른 IV로의 진출간선이 없으므로 병합대상이나 여기서 PIPE2.F가 직접 VALVE.V에 묶여 있으므로 이 경우는 병합하지 않는다. CSTR.T에는 진입 간선에 연결된 IV가 세 개 있으나 모두 MV이므로 병합하지 않는다. PIPE3.F의 경우는 VALVE.F, VALVE.V, PIPE2.F, CSTR.P까지 차례로 병합을 수해하게 된다. PIPE3.C1과 PIPE3.C2의 경우도 비슷하게 각각 VALVE, PIPE2, CSTR의 C1과 C2를 차례대로 병합해 나가게 된다.

이 예제의 경우에는 재순환이 존재하지 않고 branch가 생기는 경우도 없으므로 나머지 단계의 병합 중 제어기 관련 병합을 제외하고는 수행할 필요 없이 끝나게 된다. 제어기의 setpoint 변수가 다른 제어기로부터 케스캐이드 연결이 아니므로 LC.SP는 LC.C로 병합된다. 이렇게 병합 단계가 끝나고 나면 이상-인과

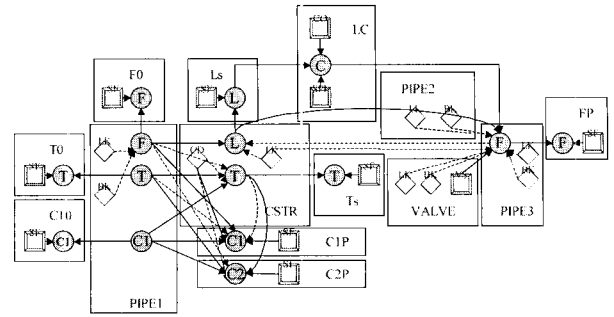


그림 13. 최종 단계에서의 Fault-Causal graph.
Fig. 13. Fault-Causal graph when the last stage finished.

그래프 (FCG)가 완성된다. 이것을 다음의 그림 13에 나타내었다.

Ⅶ. 결론

본 연구에서는 화학공정 이상진단 분야에서 널리 사용되는 정성적 모델을 이용한 방법의 근본이 되는 지식 모델의 합성을 자동화하기 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다.

1)이해하기 쉽고 빠른 시간 내에 대상 공정의 정확한 인과 모델을 구축할 수 있도록 각 단위 공정 장치별로 모듈화한 지식을 표현할 수 있도록 역할-거동 모델 표현방법을 개발하였다. 이 모델에서는 공정 장치내부의 거동과 이상과의 관계, 각 공정장치 상호간의 역할 등을 이상-거동 모델, 구조-역할 모델을 통하여 표현할 수 있다. 그리고 개발된 역할-거동 모델의 바탕이 되는 기본 이상-거동 모델을 정의하고 공정의 구조-역할 모델 구축과 반응 및 분리 모델 구축을 통하여 specific 이상-거동 모델로 합성하는 방법을 제시하였다.

2)단위 장치별로 구성된 specific 이상-거동 모델로부터 공정 전체의 인과 모델인 이상-인과 그래프를 자동화된 방법으로 합성할 수 있도록 그 알고리즘을 개발하였다.

3)개발된 역할-거동 모델링 방법과 이상-인과 그래프를 합성하는 알고리즘을 전문가 시스템 개발 도구인 G2를 통하여 시스템으로 구현하고 그 구조를 제시하였다. 구현된 시스템을 이용하여 다양한 공정에 대한 사례 연구를 통해 제안된 방법이 진단에 필요한 공정 인과 지식 모델을 효율적으로 합성할 수 있음을 보였다.

개발된 정성적 모델 자동 합성 시스템은 다음과 같은 특징을 갖는다.

4)객체 지향적인 개념을 바탕으로 장치별 이상-거동 모델이 구축되므로 필요한 장치에 따라 새로운 모델을 구축하는데 있어서 재사용성과 확장성을 제공한다.

5)직관적인 인터페이스와 직관적인 이상-거동 모델 구축방법 및 구조-역할 모델 구축 방법을 제공하므로 새로운 공정에 적용하여 필요한 정성적 모델을 구축하는데 시간을 크게 단축할 수 있다.

6)이상진단을 위한 모델의 합성 뿐 아니라 필요하다면 여러 분야에서 사용되는 유향 그래프를 기반으로 하는 정성적 모델을 구축하는데 응용될 수 있다.

이와 같이 특정 공정에 무관한 지식과 특정 공정에 의존하는 지식을 분리하여 해당 공정의 모델을 표현할 수 있는 역할-거동 모델링 방법을 제한하였으며 이를 이용한 해당 공정의 정성

적 인과 모델인 이상-인과 그래프를 합성하는 방법을 제안하였다. 또한 이의 구현을 통하여 제안한 방법이 이상진단을 목적으로 하는 방법에 적합한 정성적 인과 모델을 효율적으로 구축할 수 있으며 기존의 수작업으로 이루어진 방법과 비교하여 적어도 비슷하거나 더 우수한 진단 결과를 나타냄을 보였다. 이는 제안된 방법이 매우 체계적이며 그 결과 생성된 인과 모델이 해당 공정의 인과 관계를 매우 효율적으로 보여주고 있다는 것이다. 앞으로도 이러한 공정 지식의 합성 방법은 이상 진단을 위한 모델 뿐 아니라 위험성 평가, 구조적 제어성 평가 등 여러 분야에서 사용되는 모델의 구축에도 응용될 수 있으리라 기대한다.

참고문헌

[1] 어수영, 장태석, 신동일, 장광식, 윤인섭, "화학공정 모델을 이용한 데이터 보정 및 gross error의 감지," 화학공학, 제 37 권, 제 5 호, pp. 663-669, 1999.

[2] 오영석, "기능-거동 모델링에 기반한 화학공정의 이상 진단에 관한 연구," 박사학위논문, 서울대학교 화학공학과, 1998.

[3] 서정철, "화학 공정의 안전성 분석을 위한 다중 모델 접근 방법," 박사학위논문, 서울대학교 화학공학과, 1997.

[4] M. A. Kramer, B. L. Palowitch, "A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph," *AIChE Journal* vol. 33, pp. 1067-1078, 1987.

[5] J. Calandranis, G. Stephanopoulos, S. Nunokawa, "DiAD-Kit/Boiler: On-Line Performance Monitoring and Diagnosis," *Chemical Engineering Progress*, pp. 60-68. January, 1990.

[6] J. Y. Fan, M. Nikolaou, R. E. White, "An approach to fault diagnosis of chemical processes via neural networks," *AIChE Journal*, vol. 39, pp. 82-88. 1993.

[7] Y. Hashimoto, K. Kawahara, Y. Tanaka, A. Yoneya, Y. Togari, "Fault diagnosis utilizing a three-Layer directed graph," *Proceedings of the 4th International Symposium on Process Systems Engineering*, pp. 101-107. 1991.

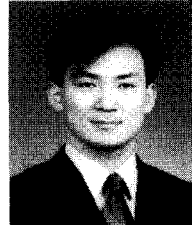
[8] A. Jalashgar, "Application of functional modeling in control systems," *Proceedings of the 3rd International Workshop on Functional Modeling of Complex Technical Systems*, pp. 65-80. 1995.

[9] J. A. Leonard, M. A. Kramer, "Radial basis function networks for classifying process faults," *IEEE Control Systems*, pp. 31-38. April, 1991.



이 동 언

1998년 서울대학교 화학공학과 졸업. 동대학원 석사(2000), 2000년~현재 서울대학교 응용화학부 박사과정. 관심분야는 화학공정 감시 및 이상 진단.



어 수 영

1995년 서울대학교 화학공학과 졸업. 동대학원 석사(1997), 동대학 박사(2001). 2001년~현재 (주)LG화학 기술연구원 선임연구원. 관심분야는 화학공정 감시 및 이상진단.



윤 인 섭

1971년 서울대학교 화학공학과 졸업. MIT 화학공학과 박사(1982). 1983년~현재 서울대학교 응용화학부 교수. 관심분야는 공정 설계 및 제어, 공정 최적화, 이상진단.