

회분식 공정의 HAZOP 분석 자동화를 위한 전문가 시스템 개발

허 보 경 · 황 규 석

부산대학교 화학공학과

(2001년 1월 4일 접수, 2001년 3월 21일 채택)

Development of Expert System for Automating HAZOP Analysis of Batch Process

Bo Kyeng Hou · Kyu Suk Hwang

Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Received 4 January 2001 ; Accepted 21 March 2001)

요 약

회분식 공정의 HAZOP 분석 전문가 시스템은 연속 공정의 HAZOP 분석 기법과는 달리 time과 sequence라는 이산적인 변수들을 고려해야 한다. 따라서 본 연구에서는 이산 변수들과 연속 변수들의 관계를 이용하여 회분식 공정의 time과 sequence 해석을 수행하는 회분식 공정의 HAZOP 분석 자동화를 위한 전문가 시스템을 개발하였다. 제안된 전문가 시스템을 Latex 제조 공정에 적용하여 그 실효성을 검토하였다.

Abstract - Expert system for automating HAZOP analysis of batch processes in contrast with continuous processes must consider the discrete variables such as time and sequence. So in this study, we have developed the expert system for automating HAZOP analysis of batch processes to analyze time and sequence on the basis of the relation between discrete variables and continuous ones. Because these variables can not be explained by the method used in the HAZOP analysis of continuous processes. The proposed expert system have been discussed on a Latex batch process to evaluate its effectiveness.

Key words : HAZOP analysis, Propagation methodology, Expert system, Batch process

1. 서 론

다양한 공정안전관리(Process safety management, PSM) 기법중 HAZOP 분석 기법은 정성적인 위험성 평가 기법으로 공정 진행 중 발생할 수 있는 모든 위험성과 문제점을 사전에 인지하여 적절한 보완을 거쳐 설계를 확정하도록 하는 것이며, 현재 운전중인 공정에 적용하여 공정을 개선함으로써 생산성과 안정성을 높일 수 있다는 점에서 현 산업체에서 가장 널리 사용되고 있는 방법 중의 하나이다 [1-3]. HAZOP 분석의 자동화에 관한 연구가

상당히 진척되어 있으나, 지금까지의 연구 활동은 연속 공정 중심으로 이루어졌기 때문에 회분식 공정과 같은 복잡한 공정의 모델링에 적합한 HAZOP 분석 모델의 연구가 미흡한 실정이다. 회분식 공정에 대한 HAZOP 분석은 많은 전문가들의 인력과 시간이 많이 투입되며, 전문가들의 수준에 많은 영향을 받으므로 객관적인 위험성 평가를 기대하기 어렵다는 단점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 회분식 공정의 HAZOP 분석 모델을 개발하고 분석 자동화를 위한 전문가 시스템을 구축하고자 한다.

[†]주저자 : kshwang@hyowon.pusan.ac.kr

2. 시스템 개요도

본 연구에서 개발한 전문가 시스템은 입력 모듈(input module)은 사용자로부터 하여금 사용자 인터페이스를 통하여 임의의 장치 이탈을 선택할 수 있도록 일정한 프레임(frame)을 제시하여 주고, 출력 모듈은(output module)은 선택된 이탈에 대한 HAZOP 분석을 수행하여 추론된 원인과 결과를 사용자에게 출력해주는 역할을 한다(Fig. 1).

추론엔진은 if-then-else를 사용하여 이탈이 발생한 라인(line)을 찾아내고, 전파식을 사용하여 이탈을 전파시키므로 해당 이탈을 해석하는 역할을 수행하며, 이상 지식 라이브러리와 대상 공정의 구조 데이터(topology data)를 이용하여 해당 이탈에 대한 원인과 결과를 추론하여 사용자에게 제공한다.

지식베이스는 일반적인 지식(generic knowledge-base)과 공정 특성 지식(specific knowledge-base)으로 나누어 관리되므로 다른 공정에 적용하기가 용이하다는 장점을 가진다. 일반적인 지식은 일반화된 장치별 이상 지식(generic cause-consequence data)과 장치 속성 지식(unit class) 등을 가지며, 공정 특성 지식은 물성 데이터(material data), P&ID, 공정의 정상 상태를 나타낸 recipe, 공정 특성 이상 지식(specific cause-consequence data) 등을 가진다.

3. 회분식 공정의 HAZOP 수행절차

본 시스템은 다음과 같은 일련의 과정들을 거쳐서 HAZOP 분석을 수행한다.

(1) 사용자는 대상 공정에 존재하는 임의의 스텝(step)을 선택한 다음, 임의의 장치(unit)에 이탈을 발생시킨다.

(2) 라인 규명 룰(rule)을 이용하여, 이탈이 발생한 장치를 포함하고 있는 라인을 찾는다.

(3) 발생한 이탈이 시간(time)이나 시퀀스(sequence)의 이탈인지를 판별하여, 만일 시간에 관한 이탈이면 전이식(transformation equation)을 이용하여 연속 변수의 이탈로 전이시킨 다음, 전이된 연속 변수의 이탈에 전파식을 적용하여 다음 장치로 이탈을 전파시킨다. 만일 이탈이 시퀀스에 관한 이탈일 경우, 시퀀스 네트워크(sequence network)에서 다음 단계의 공정을 탐색한 후, 전이식을 이용하여 연속 변수의 이탈로 전이시킨 다음, 전이된 연속 변수의 이탈을 전파식에 적용시켜 다음 장치로 전파시킨다. 시간과 시퀀스에 관한 이탈이 아닌 경우, (5)를 수행한다.

(4) 지식베이스에서 시간과 시퀀스에 관한 이탈의 원인과 결과를 원인·결과 프레임에 추가한다.

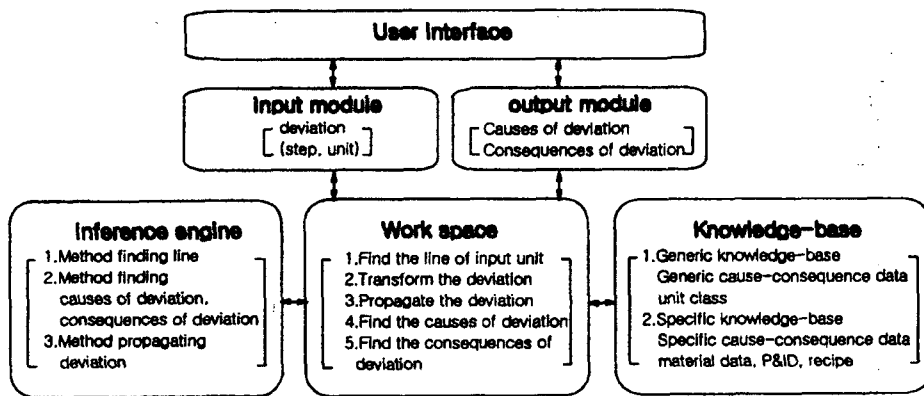


Fig. 1. Architecture of expert system

(5) 라인의 이탈 전파 방향을 결정한다(이탈 전파 방향의 디폴트값은 종결장치(terminal unit)로 설정되어 있으므로 종결장치 방향으로 이탈을 전파시킨다).

(6) 이탈의 전파 방향이 종결장치라면, 다음 장치로 이탈을 전파시킨 다음, (7)을 수행하고, 만일 소스장치(source unit)라면, 바로 앞 장치로 이탈을 전파시킨 다음, (8)을 수행한다.

(7) 이탈을 전파 받은 장치 위험 상태의 발생 가능성 여부를 판별하여 만일 위험 상태가 발생이 하면, 지식베이스에서 이탈의 결과를 결과 프레임에 추가하고, 그렇지 않으면 다음 장치로 이탈을 전파시킨다.

(8) 이탈을 전파 받은 장치 위험 상태의 발생 가능성 여부를 판별하여 만일 위험 상태가 발생이 하면, 지식베이스에서 이탈의 원인을 원인 프레임에 추가하고, 그렇지 않으면 다음 장치로 이탈을 전파시킨다.

(9) 이탈을 전파 받은 장치가 중요장치(key unit)인가를 판별하여 만일 중요장치가 아니면, 계속해서 다음 장치로 이탈을 전파시키면서 탐색된 이상의 결과·원인을 원인·결과 프레임에 추가한다.

(10) 이탈을 전파 받은 장치가 중요장치라면 기능 네트워크(functional network)에서 다음에 조작되는 라인들과 앞에 조작되는 라인들을 탐색한다.

(11) 라인의 존재 유무를 판별하여 탐색된 라인이 있다면, 그 라인의 소스장치·종결장치로 이탈을 전파하고, (5)로 돌아가서 같은 과정을 반복하여 모든 이탈의 결과·원인을 탐색한다.

(12) 만약 탐색된 라인이 없다면, 이탈의 전파 방향이 소스장치인지 아닌지를 판별한다(이탈의 전파 방향의 디폴트값은 종결장치로 설정되어 있다).

(13) 이탈의 전파 방향이 소스장치라면, HAZOP 분석이 완료되었음을 알리고 추론된 원인과 결과를 사용자에게 제시한 후, 다른 이탈에 대한 HAZOP 분석 수행을 위해 대기상태에 들어간다.

(14) 이탈 전파 방향이 소스장치가 아니라면, 이탈 전파 방향을 소스장치로 재설정한다 다음에 이탈이 발생한 장치로 되돌아간 후, (5)로 돌아가서 같은 과정을 반복 수행한다.

4. 공정의 표현 방법

4.1. 공정구조의 표현

본 연구의 대상공정은 Latex 제조 공정으로 산업체에서 폭넓게 사용되고 있는 전형적인 회분식 공정으로, Acrylonitrile(AN), Butadiene(BD), Styrene(ST)와 같은 monomer들과 그 외의 다양한 chemical들이 유화 중합 반응을 위한 물질들로 이용되고, liquified NH₃로 온도를 제어한다(Fig. 2). 반응 조건으로 온도는 85℃ 이하, 압력은 5.0kg/cm² 이하로 유지해야 한다.

공정 구조는 중요장치 중심으로 물질의 종류와 흐름에 따라 장치(unit), 파이프(pipe), 중요장치들로 구성되어 있는 라인들로 세분화하고, 구체화된 장치 정보를 라인별로 표현하였다. 여기서, 중요장치는 라인의 양 끝점을 구성하며, 라인 내에서 소스장치나 종결장치의 역할을 수행하는 장치를 말한다. 라인은 중요장치들 사이에 존재하는 모든 장치나 파이프들의 집합을 말한다.

각 라인은 장치, 파이프, 중요 장치로 구성되어 있으며, 각 구성 성분들은 고유한 이름(reactor-1, pump-1 등)을 가지고 있다. 또한 라인 상에서의 장치 위치를 표현하기 위해 다음과 같은 명명법을 사용하여 지정한 후, 해당 장치의 속성변수로 저장한다. 장치는 OOOO으로 명명되는데 처음 두 자리는 라인 번호를 나타내고, 나머지 두 자리는 라인내의 장치의 위치를 나타낸다. 파이프는 OOOOOOOO으로 8단위로 명명되는데 앞의 네 자리는 입력 장치(inlet unit)의 번호를, 나머지 네 자리는 출력 장치(outlet unit)의 번호를 나타낸다. 중요 장치는, 그 장치가 소스 장치로 사용되는 라인들을 나타내는 source 속성(attribute)과 그 노드가 종결 장치로 사용되는 라인들을 나타내는 terminal 속성을 가지고 있다. 다음은 Latex 공정의 일부인 KPS charging line을 이러한 방법으로 표현한 예를 보여준다(Fig. 3).

예> KPS charging line: LINE #05
 unit 0502 : LINE #05의 두 번째 장치
 pipe 05010502 : 입력 장치로 unit 0501, 출력 장치로 unit 0502를 가지는 연결 장치
 unit 0504 : source attribute ⇒ LINE #18
 terminal attribute ⇒ LINE #01, LINE #05, LINE #09, LINE #11, ...

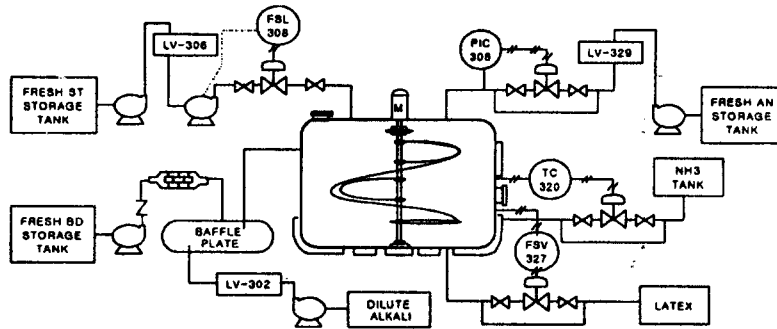


Fig. 2. Latex process

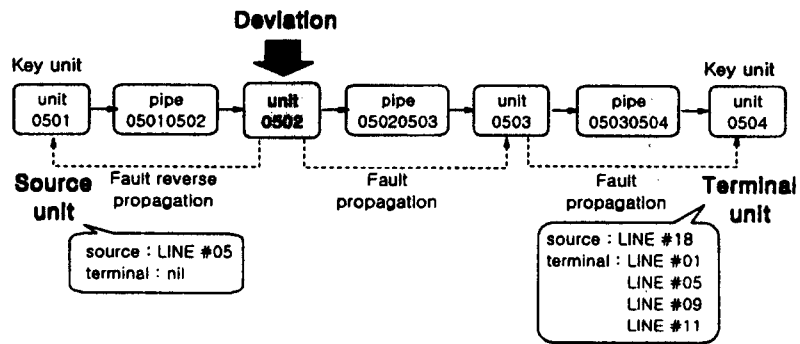


Fig. 3. The presentation of process topology

4.2. 의미 네트워크(Semantic network)

의미 네트워크 기법은 객체(object), 개념, 사건 등을 나타내는 노드(node)와 노드들 사이의 관계를 나타내는 아크로써 지식을 표현하는 기법이다. 본 연구에서는 기능네트워크와 시퀀스 네트워크(sequence network)라는 두 가지 의미네트워크로 대상 공정의 상호 인과 관계를 표현하여 전 공정에 관한 이탈의 전파가 가능하도록 하였다.

정상 상태에서 각 공정간의 순차적인 인과 관계를 나타내는 의미 네트워크는 다음과 같은 구성 요소를 가진다.

- Steps : 공정의 시퀀스에 따라 구분되는 공정 검토 구간.
- Nodes : 시작점, 끝점을 구성한다.
- Relations : 공정 스텝과 공정간의 관계를 설명한다.

구체적인 일례로서 Latex 제조 공정의 의미네트워크를 제시하였으며(Fig. 4), 또한 의미네트워크에서 사용되어지는 relation들의 정의를 제시하였다(Table 1).

기능 네트워크는 정상 상태에서 각 공정간의 기능적인 인과 관계를 의미 네트워크로 표현한 것으로 다음과 같은 구성 요소를 가진다.

- Key unit : 라인의 양 끝점을 구성하며, 라인 내에서 소스장치나 종결장치의 역할을 수행하는 장치
- Line : 중요장치를 중심으로 물질의 종류와 흐름에 따라 구분되어진다. 장치, 파이프, 밸브들로 구성되어 있다.
- Relation : 라인들과 중요장치들간의 물질과 열의 흐름 관계를 표현한다.

구체적인 일례로서 Latex 제조 공정의 기능네트워크를 제시하면 다음과 같다(Fig. 5).

회분식 공정의 HAZOP 분석 자동화를 위한 전문가 시스템 개발

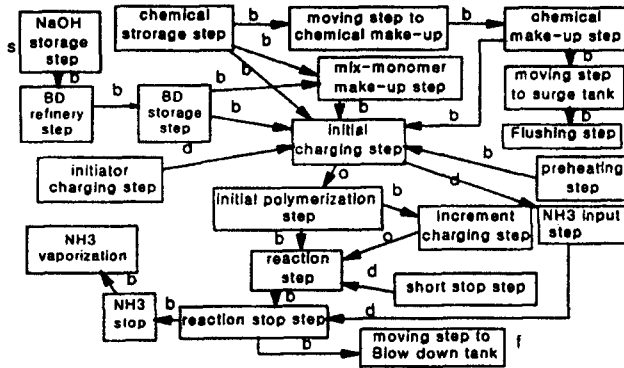


Fig. 4. Sequence network for Latex process

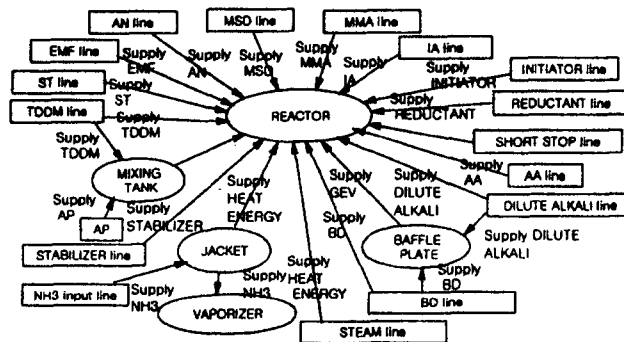


Fig. 5. Functional network for Latex process

Table 1. Relations of sequence network

Relation	Symbol	Definition
A before B	b	A step occurs previous to B step
A during B	d	A step occurs during B step
A overlap B	o	A step occurs after B step happens to be and A step is completed after B step is completes.
start	s	Step starts.
finish	f	Step finishes.

4.3. 공정 장치의 레시피(recipe)

각 시스템의 라인 레시피(Line recipe)와 각 라인의 장치 레시피(unit recipe)를 매트릭스

(matrix)로 나타내어 물질의 흐름 여부를 나타낸다. 라인 레시피는 라인의 개·폐(open·closed) 상태를 매트릭스로 나타낸 것으로, 라인이 열린 상태(open)는 라인 내에 물질의 흐름이 있음을 나타내고, 닫힌 상태(closed)는 라인 내에 물질의 흐름이 없음을 나타낸다(Table 2). 장치 레시피는 공정구조 데이터(topology data)에 의해 제시된 라인 세부 장치들의 정상 상태에 관한 정보를 보여준다(Table 3).

Table 2. Line recipe (per step)

step \ line	AA	ST	BD	NH ₃	Latex
AA Charging	O	C	C	O	C
Reaction	C	C	C	O	C

C: closed/off, O: open/on

Table 3. Unit recipe (per line)

unit \ line	u0101	u0102	u0103	u0104	u0105
AA line open	O	O	O	O	C
AA line closed	C	C	C	O	C

5. 장치의 계층화(Unit classification)

본 연구에서는 장치의 속성을 공정 내에서의 장치 역할과 장치 자체의 특성으로 나누어 계층적으로 분류하여 정리하였다.

공정 내에서의 장치 역할을 다음과 같은 5가지의 장치로 나누어 분류하였다.

- (1) 소스장치(source unit) : 물질의 흐름이 시작되는 장치
- (2) 제어장치(control unit) : 수동, 자동으로 구분되며, 물질의 흐름을 제어하는 장치
- (3) 종결장치(terminal unit) : 물질의 흐름이 끝나는 장치
- (4) 수송장치(transfer unit) : 물질 흐름의 통로가 되는 장치
- (5) 중요장치(key unit) : 라인의 양 끝점을 구성하며, 라인 내에서 소스장치나 종결 장치의 역할을 수행하는 장치를 말한다.

6. 이상 지식(Cause-consequence data)

6.1. 일반적인 이상 지식

본 연구에서는 대상 공정에 의존하지 않는 장치의 고유한 특성에 의해 발생하는 이상 지식들을 구조화하여 시스템에 유연성을 부가하였다.

일반적인 이상 지식의 클래스는 속성 변수로 cause와 consequence를 가진다. cause는 각 이탈에 대한 구체적인 원인들을 속성값으로 가진다. 또한, consequence도 역시 각각 이탈에 대한 구체적인 결과들을 속성값으로 가진다. 다음은 일반적인 이상 지식의 상위 클래스의 예로서 펌프 클래스(pump class)를 보여준다.

예1> pump - cause

- no flow : 펌프 작동 중지
- less flow : 펌프 누출(leak)
- more flow : 과잉 펌핑(pumping) ...

여기서, “펌프 작동 중지”라는 이상은 연속 변수 “no flow”라는 이탈을 발생시킨다. 즉 펌

프 장치의 뒤에 위치하고 있는 장치에서 “no flow”라는 이탈이 발생되어, 이탈이 역전파되면, 일반적인 이상 지식으로부터 “펌프 작동 중지”라는 이상의 원인이 탐색되어 사용자에게 제시된다.

예2> pump - consequence

- no flow : 공회전으로 인한 펌프 고장, 과열로 인한 펌프 손상
- less flow : 펌프 과열로 인한 손상

여기서, 정상 상태로 작동하고 있는 펌프에 “no flow”라는 이탈이 발생하면, “공회전으로 인한 펌프의 고장과 과열로 인한 펌프의 손상”이라는 결과가 HAZOP 분석 수행 결과로 사용자에게 제시된다.

6.2. 공정 특성 이상 지식

장치의 배치에 따른 공정의 구조에 영향을 받는 이상 지식들을 공정 특성 이상 지식으로 정리하여 제시하였다.

공정 특성 이상 지식은 MSDS(Material Safety Data Sheets), 시퀀스 원인-결과 데이터(sequence cause-consequence data) 등으로 구성되어 있다. 대상 공정이 다루는 화합물은 그 물질의 특성, 부식성, 폭발 한계 등의 특성을 가지고 있으므로 위험 상황을 발생시킬 수 있다. MSDS는 이러한 물질의 특성으로 인해 발생할 수 있는 이상 지식들을 정리한 물질 특성 데이터의 집합체이다.

시퀀스 원인-결과 데이터는 공정의 시퀀스 이탈로 인해 발생할 수 있는 이상 지식이 제시되어 있다. 다음은 공정 특성 이상 지식의 예로서 cooling step의 결과를 보여주고 있다.

예> Cooling step - consequence

- Cooling step left out (cooling 조작 생략) : reactor 폭발(발열 반응)
- Cooling step too late (cooling 조작 지연, 허용범위·시간·조건외 초과) : 조성 이상(부생성물 생성), 수율 감소 ...

7. 이탈 전파

이탈의 전파를 위해 공정 변수들을 연속 변수(Q, P, T, ...)와 불연속 변수(sequence, time)로 구분하였고, 이탈의 전파는 이러한 변수들을 구분하여 각기 다른 방법으로 수행하였다.

7.1. 연속 변수의 이탈 전파

간단한 부호 유향 그래프(SDG) 기법에 의해 도출된 전파식에 의해 이탈 전파가 이루어진다.

<Propagation equation>

- T = f(Tin) (1)
- L = f(Qin, -Qout) (2)
- P = f(L, T, Pin) (3)
- Qout = f(L, P, Qin) (4)
- Pout = f(Pin, P) (5)
- Tout = f(T, Tin) (6)

전파식을 적용시키기 위해 가이드 워드 "less"는 "-"로 "more"는 "+"로 인식되게 한다. 전파식의 이해를 돕기 위한 예로 (2)식을 설명해 보면, L = f(Qin, -Qout)은 반응기, 탱크, 용기에서의 레벨(level)은 유입되는 유체의 유속과 유출되는 유체의 유속 차에 비례함을 의미한다.

7.2. Sequence와 time의 이탈

시퀀스와 시간의 이탈은 먼저 시퀀스 네트워크에서 앞이나 다음 스텝의 라인 레시피에서 open된 라인들을 탐색한 후, 기능 네트워크에서 이탈이 발생한 스텝에 의해 영향을 받는 중요장치를 탐색한다. 그리고 나서 이탈의 전이식에 의해 연속 변수의 이탈로 전이시킨 후 전이된 연속 변수의 이탈을 중요장치에 전파시킨다.

연속 변수로의 전이를 위해 스텝을 물질(mass)의 흐름에 따라 세 스텝으로, 열(heat)의 흐름에 따라 두 스텝으로 분류하고, 그 각각에 적합한 전이식을 제시하였다. 여기서, "/" 기호는 연속된 step임을 나타낸다(즉, 'charging step/reaction step'은 charging step 다음에 reaction step이 실행됨을 나타낸다). 또한, transformation equation을 적용시키기 위해 가이드 워드 'too late'와 'less'는 '-'로 'too early'와 'more'는 '+'로 인식되게 한다.

<Transformation equation>

- ① 물질의 흐름에 따라 세 스텝으로 분류한다.
 - Charging step / reaction step : Q = f(s), Q = f(ti)
 - Reaction step / reaction step : 발열 반응과 흡열 반응인 경우로 나누어진다.
 - A. 발열반응 : T = f(s), T = f(ti)
 - B. 흡열반응 : -T = f(s), -T = f(ti)

- Reaction step / discharging step : 발열 반응과 흡열 반응인 경우로 나누어진다.
 - A. 발열반응 : T = f(s), T = f(ti)
 - B. 흡열반응 : -T = f(s), -T = f(ti)
- ② 열의 흐름에 따라 두 스텝으로 분류한다.
 - Heating step : 고온 steam이나 전기로써 유체를 가열시키는 단계이다.
 - T = f(s), T = f(ti)
 - Cooling step : coolant로써 유체를 cooling시키는 단계이다.
 - T = f(s), -T = f(ti)

전이식의 이해를 돕기 위해 Reaction step / reaction step에 "step too late"가 발생하였을 경우를 예로써 설명해 보자. 발열 반응인 경우, Initial reaction에서 "step too late"는 주변의 cooling 시간은 정상이므로 less temp.를 발생시키며, 흡열 반응인 경우, Initial reaction에서 "step too late"는 주변의 열 공급 시간은 정상이므로 제시간에 흡열되어야 할 양과 공급 열량의 차이에서 열량이 남으므로 more temp.를 발생시킨다.

8. HAZOP 분석 실행 예

회분식 공정을 위한 HAZOP 분석 자동화 시스템을 이용하여 Latex 공정에 적용하여 보았다. 불연속 변수인 "step too late"라는 이탈이 "initial polymerization step"에서 발생할 경우, Q = f(s)라는 이탈 전이식을 적용시켜 "step too late"이라는 불연속 변수를 "less flow"라는 연속 변수의 이탈로 전이시킨 후, 시퀀스 네트워크에서 다음 스텝을 탐색하여 그 스텝의 중요장치에 이탈을 전파시킨다. 이제 불연속 변수의 이탈이 연속 변수의 이탈로 전이되었으므로 연속 변수의 이탈 전파 방법을 적용시켜 모든 이탈의 결과 프레임을 생성할 수 있다(Fig. 6).

다음으로 이탈의 역전파를 고려해 보자. 이탈의 전파에서와 같은 전이식 Q = f(s)를 적용시켜 "step too late" 불연속 변수의 이탈을 "less flow"라는 연속 변수의 이탈로 전이시킨 후, 시퀀스 네트워크에서 "before" relation을 가진 스텝을 탐색하여 그 스텝의 중요장치에 이탈을 역전파시킨다. 그 후 연속 변수의 이탈 전파 방법을 적용시켜 모든 이탈의 원인 프레임을 생성한다.

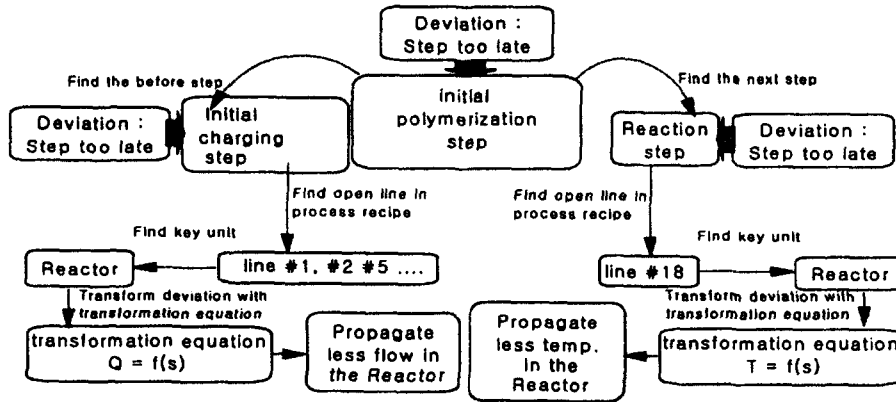


Fig. 6. Deviation propagation in Latex process (in case of 'step too late')

Table 4. Comparison with actual plant data from HAZOP studies carried out at Latex process

Results of HAZOP analysis in actual plant		Results of HAZOP analysis in this model	
Cause	Consequence	Cause	Consequence
No preheating for increment BD, Mix-monomer charge.	Increment polymerization reaction is delayed.	Initial polymerization isn't carried out. No Preheating for increment BD & mix-monomer charge. Reactor leakage. The malfunction of set point. The malfunction of sensor.	Polymerization reaction is delayed. Wrong Latex concentration. Making residual products. Decreasing in yield.

본 연구에서 제시한 모델을 적용시켜 수행한 HAZOP 분석 결과는 실제 공장에서 수행한 HAZOP 분석 결과를 모두 포함하고 있으며, 수작업으로 수행한 HAZOP 분석 결과보다 더 많은 원인파 결과를 유추할 수 있음을 볼 수 있다(Table 4).

하여 대상 공정의 순차적인 인과 관계와정의 기능적인 인과 관계를 표현하였다. 제안된 전문가 시스템을 Latex 제조 공정에 적용하여 그 실효성을 검토한 결과, 보다 상세한 HAZOP 결과를 얻을 수 있었다.

9. 결 론

본 연구에서 제안된 회분식 공정의 HAZOP 분석 전문가 시스템은 이산 변수들과 연속 변수들의 관계를 이용하여 회분식 공정의 time과 sequence 해석을 수행한다. 또한 이상 지식을 일반적인 이상 지식과 공정 특성 이상 지식으로 나눈 후, 일반적인 이상 지식에 객체 지향 개념을 도입하여 클래스로 정리함으로써 시스템에 유연성을 부가하였다. 시퀀스 네트워크와 기능 네트워크라는 의미 네트워크 기법을 사용

참 고 문 헌

1. "HAZOP training manual", Technica Inc. consultants in Engineering and Science (1991).
2. Kramer, M. A., Palowitch, B. L.: "A rule-based approach to fault diagnosis using the signed directed graph", AICHE J., 33, 7-13 (1987).
3. Ramesh, V., Venkat, V.: "Experience with an expert system for automated HAZOP analysis", Computers chem. Eng. 20, S1589-S1594 (1996).