

## 회분식 공정의 HAZOP 분석 자동화를 위한 지식기반구조 및 알고리즘

노미영 · 이예승 · 허보경 · 신동일\* · 황규석†

부산대학교 화학공학과

\*서울대학교 응용화학부

(2000년 7월 24일 접수, 2001년 3월 20일 채택)

## Knowledge Framework and Algorithm for Automating HAZOP Analysis of Batch Processes

Mi Young Noh, Ye Seung Lee, Bo Kyeng Hou, Dongil Shin\* and Kyu Suk Hwang†

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

\*School of Chemical Engineering, Seoul National University, Seoul 151-742, Korea

(Received 24 July 2000; accepted 20 March 2001)

### 요 약

회분식 공정의 time과 sequence 해석은 연속 공정의 HAZOP 분석 기법으로는 설명될 수 없다. 따라서 본 연구에서는 회분식 공정을 투입, 반응, 유출의 세 가지 단계로 구분한 후, 배관 및 반응기 등에서의 이탈을 각 장치의 이탈전파모델을 사용하여 전파시킨다. 그리고 이산 변수들과 연속 변수들의 상호 인과관계를 고려한 회분식 공정의 HAZOP 분석을 행하는 방법을 개발하여 Latex 제조 공정에 적용하여 그 실효성을 검토하였다.

**Abstract** – The analysis of discrete variables such as time and sequence in batch process can not be explained by the method used in the HAZOP analysis of continuous processes. So in this study, we have classified the operation of batch processes into charge, reaction and discharge step, and have propagated the deviation by using propagation models of each unit. And we have developed the methodology for HAZOP analysis of batch processes by using the causal relationship between discrete variables and continuous ones and then have discussed the performance of the methodology on a latex batch process to evaluate its effectiveness.

**Key words:** HAZOP Analysis, Batch Process, Propagation Models

### 1. 서 론

회분식 공정은 화학물질의 제조가 손으로 행해졌을 때부터 채택되어 왔던 생산방식으로 석유화학의 발전에 따른 대량 연속 생산 방식에 밀려난 감도 있지만, 최근 고급 화학물질 지향의 다품종 소량 생산방식을 위한 다목적 플랜트용으로 새로이 주목받고 있고 이를 대상으로 하는 위험성평가 및 HAZOP 분석의 자동화에 관한 연구가 진행되고 있다 [1, 4, 12]. 즉 규모가 크고 복잡한 화학 공장의 산업 재해 원인들은 복잡적으로 작용하기 때문에 위험성 평가 작업은 많은 분야의 전문가와 많은 시간과 노력을 필요로 한다. Venkatasubramanian은 페트리 넷(petri net)로 레시피(recipe)와 각 장치의 특성을 각각 표현하여 회분식 공정의 HAZOP을 실행하는 방법을 제안하였으나 페트리 넷의 구성이 복잡하고 어렵다는 단점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 회분식 공정을 각각의 단계별로 구분하여 불연속성을 규명한 다음, 단계들간의 상관관계에 근거한 이탈전파 방법을 이용하는 HAZOP 분석 전문가 시스템을 구축하고자 한다. 이를 위해서 원료 물질의 입력부와 출력부에 해당하는 charge step과 discharge step

은 연속 공정으로 취급하여 연속 공정의 변수 이탈전파법을 적용하고, reaction step은 불연속성을 고려한 변수 이탈전파법을 개발하여 회분식 공정의 HAZOP 분석 모델을 제시하고자 한다.

### 2. 회분식 공정의 HAZOP 분석

#### 2-1. 대상공정 분석

HAZOP 분석의 기본이 되는 분석 단위는 사고원인 및 결과를 평가하기 위한 단위장치 및 배관으로 중복을 최소화하여 효과적으로 위험성을 평가할 수 있도록 선정해야 한다. 본 연구에서는 물질이 채류할 수 있는 vessel과 vessel사이의 pipeline을 분석단위로 하였다.

불연속적인 조업 특성을 가지고 있는 회분식 공정은 각 step의 특성과 분석단위를 고려하여 charge step, reaction step, discharge step의 세 부분으로 구분하였다(Table 1). Charge step과 discharge step은 물질의 입력과 출력 부분으로서 장치간의 물질의 이동만 존재할 뿐 반응이나 그 외 불연속적인 요소가 존재하지 않는다. 이러한 step에서는 연속 공정에 적용하였던 이탈 전파법이 적용가능한 step이므로 회분식 공정 내 유사 연속(pseudo continuity) step이라고 정의한다. 그러나 reaction step 내에서는 여러 task들이 연속적으로 수행되어야 하고 각 task 수행 시에

†E-mail: kshwang@hyowon.pusan.ac.kr

Table 1. Step classification

State	Step				
	Charge	Intermediate	Reaction	Intermediate	Discharge
Pseudo continuity	O				O
Discontinuity		O	O	O	

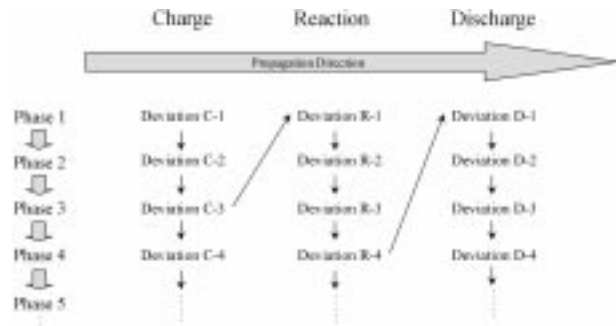


Fig. 1. Overall propagation of deviation.

운전자의 오조작으로 인한 사고가 발생할 수 있으므로 조작 실행으로 step 내 주 장치인 반응기에서 발생할 수 있는 공정 변수 이탈과 반응기의 주변장치 오작동으로 인한 공정 변수 이탈을 고려해야 한다.

또한 세 step 간의 불연속적인 이탈 전파를 고려하기 위해 charge step과 reaction step, reaction step과 discharge step 사이의 이탈 전파를 순서대로 실행하여 전공정에 걸친 HAZOP 분석을 수행하고자 한다(Fig. 1).

## 2-2. 이탈의 생성

이탈을 생성하기 위해서는 가이드워드(guidewords)와 공정변수에 관한 정의가 필요하다. 가이드워드는 공정변수에 적용하여 이상 상태를 일으키는 원인이 되는 공정변수의 이탈을 구성하는 No, More, Less, Reverse, Other than, As well as, Part of 객체로서 각각에 대한 개념은 Table 2와 같다.

본 연구에서는 연속변수(continuous variable)에 적용 가능한 가이드워드와 불연속 변수(discontinuous variable)에 적용하는 가이드워드를 구분하여 정의하지 않는다. 즉, 시간을 고려해야 하는 불연속 변수에 적용하기 위한 가이드워드로는 No, Less, More를 그대로 사용하되 Less는 Early의 개념으로, More는 Late의 개념으로 정의한다. 예를 들어 “Less Cooling-start-time”은 “Early Cooling-start-time”의 개념으로 cooling task의 수행 시작시간이 정상적인 수행 시작시간보다 일찍 시작됨을 의미한다.

공정 변수는 공정 장치간의 흐름특성을 나타내는 연속변수와 task에 관련되어 있는 불연속변수로 구분할 수 있다. 연속변수에는 flow rate, pressure, temperature, level, concentration가 있으며, 불연속변수에는 회분식 공정에서 중요한 문제로 인식되는 task 수행시에 사용되는 start/stop time 변수가 있다. 예를 들어, Agitation-start-time(TAi)는 반응기의

Table 2. Guidewords for HAZOP of batch process

Guidewords	Description
No	Negation of the design intent
Less(Early)	Quantitative decrease
More(Late)	Quantitative increase
Reverse	Local opposite of the intent
Other than	Complete substitution
As well as	Qualitative increase
Part of	Qualitative decrease

Table 3. Process variables of HAZOP in batch process

Process variables	Symbol	Description
Continuous variables	Q	Flow rate
	P	Pressure
	L	Level
	T	Temperature
	C	Concentration
Discontinuous variables	THi	Heating-start-time
	THt	Heating-stop-time
	TCi	Cooling-start-time
	TCt	Cooling-stop-time
	TAi	Agitate-start-time
	TAt	Agitate-stop-time

보조 장치인 agitator의 조작시간을 의미하고, “Less Agitation-start-time”은 “Early Agitation-start-time”으로 agitator의 조작 시간이 정상적인 조작시간보다 일찍 시작되었다는 이탈을 의미한다(Table 3).

## 3. 지식 표현 방법

본 연구에서는 불연속적인 특성을 가지고 있는 회분식 공정의 HAZOP 분석 자동화를 위한 전문가 시스템 구축하기 위해서 우선 위험성 평가에 필요한 지식들을 정의하고 이를 적절하게 표현하는데 필요한 지식 모델(knowledge model)을 구축하였다. 회분식 공정의 HAZOP 자동화 시스템의 지식베이스(knowledge base)는 basic knowledge, unit knowledge, unit malfunction knowledge의 계층적인 구조로 되어 있다.

### 3-1. Basic knowledge

위험성 평가의 기본적인 정의를 포함하고 있는 basic knowledge는 guidewords, process variables와 definition of cause and consequence로 나눌 수 있다. 공정의 위험과 사고의 원인 및 결과를 정의하기 위해서는 우선 회분식 공정에서 일어날 수 있는 사고의 원인과 결과에 관한 규명과 상호 연관관계의 파악이 필요하다.

#### 3-1-1. 이탈 원인의 도출

이탈 원인은 공정 및 단위 장치에서 발생할 수 있는 최초의 사건(root malfunction)으로 Fig. 2와 같이 이탈이 전파되어 기능이상(malfunction)이나 공정변수의 이탈로 인한 사고를 유발시킨다.

장치나 배관으로부터 발생 가능한 이상의 원인을 체계적으로 제시하기 위해서는 가이드워드, 공정변수, 장치의 관계성에 근거한 모델을 추출해야 한다. 분석 대상인 장치로부터 이상 원인을 발견할 때 고려해야 하는 요소들로는 다음과 같은 것이 있다.

- (1) 상부흐름(upstream)에 위치한 장치의 종류
- (2) 하부흐름(downstream)에 위치한 장치의 종류
- (3) 장치에서 발생해서 급속히 진행되는 물리적인 고장(rupture, blockage, maintenance error, electrical failure)
- (4) 장치에서 발생해서 서서히 진행되는 물리적인 이상(leak, gradual

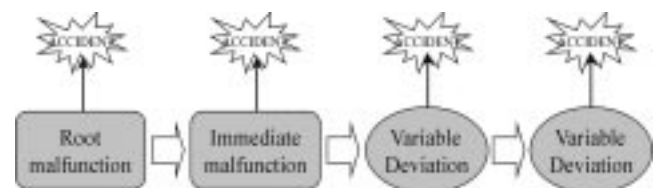


Fig. 2. Accident mechanism.

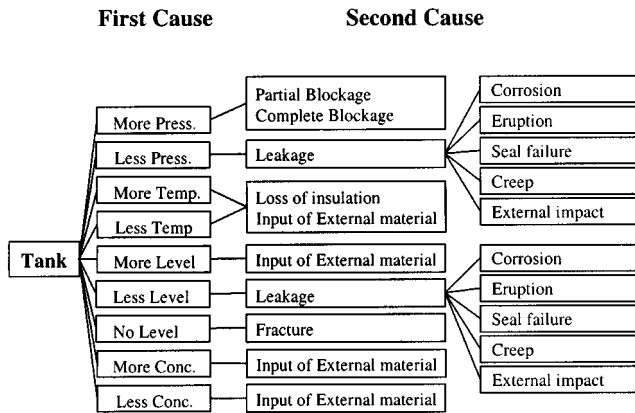


Fig. 3. The causal knowledge of the equipment.

blockage, fouling)

(5) 기타 계통에 위치한 설비의 종류(relief valve)

(6) 외부 현상(external heat source, external collision)

이러한 원인의 유도 과정에서 전개 과정은 1차 원인과 2차 원인 체계로 구분할 수 있다.

(1) 1차 원인: 위험성 분석 중인 장치 내 공정변수의 이탈

(2) 2차 원인: 1차 원인을 야기시키는 세부적인 장치의 고장 및 비정상 상태 장치

1차 원인과 2차 원인 지식은 Fig. 3과 같다.

### 3-1-2. 이탈 결과의 도출

이탈로부터 유도될 수 있는 결과의 특성을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 장치내에서 발생하는 결과
- (2) 상부흐름에 위치한 장치에서의 결과
- (3) 하부흐름에 위치한 장치에서의 결과
- (4) 기타 계통에서 발생하는 결과

이를 HAZOP의 본질적인 목적인 위험 및 조업성 문제의 해석에 관점을 맞추어 1차 결과와 2차 결과로 구분하면 다음과 같다.

- (1) 1차 결과: 2차 결과를 유도시킬 수 있는 More Temp., More Press. 등의 공정변수 이탈
- (2) 2차 결과: fire, explosion, toxic release, abnormal shutdown 등



Fig. 4. Overall architecture of automatic HAZOP analysis.

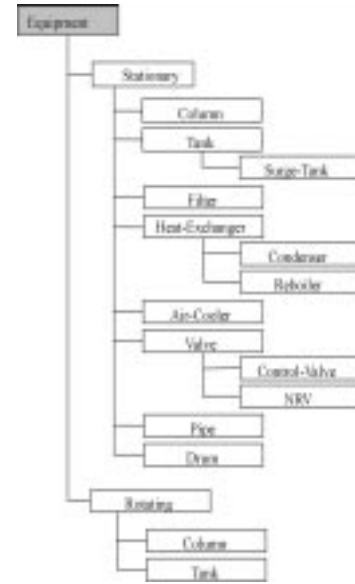


Fig. 5. Class hierarchy of units.

공정과 이탈, 원인 및 결과간의 전체적인 정보전달체계는 Fig. 4와 같이 정의할 수 있다.

### 3-2. Unit knowledge

대상공장이 가지고 있는 공정장치는 각각의 기능을 가지고 있어 원하는 물질을 얻기 위해 임의의 절차대로 수행되어야 한다. 이러한 공정장치들로는 일반적으로 반응기, 증류탑, 열교환기 등과 같이 안전 장치를 제외한 대부분의 단위장치들이 이에 해당되며, vessel, 열교환기, 증류탑 등의 stationary equipment와 펌프와 같은 rotating equipment의 두 가지로 구별된다(Fig. 5).

공정장치는 지식 베이스의 확장성을 보장하고 객체 지향적 프로그래밍이 가능하도록 객체 지향 프레임(object-oriented frame) 구조로 되어 있다. 이와 같은 프레임 구조에서 하부에 위치한 프레임은 상부 프레임의 특성(attribute)을 그대로 상속받으며, 필요에 따라 상속받은 특성은 무시되고 새로운 특성을 부여받을 수 있으므로 지식의 확장 및 추가가 용이하다는 장점을 가진다. 공정장치의 하부에 위치하는 각 객체(object)도 자신의 고유한 특성을 가질 수 있다. 각 프레임의 기본값(default value)은 각각의 공정장치가 가지는 정상 상태값이 저장되어 있는 속성변수의 값을 의미한다. 이것은 공정상태가 정상인 경우, 임의의 이상으로 발생할 수 있는 위험성을 평가하는데 있어서 사용자가 각 속성변수에 대하여 모든 정상 상태의 값을 별도로 지정해야 하는 번거로움을 줄여주는 효과를 가진다.

공정 장치가 공통적으로 가지는 속성변수로는 service-flow, status, failure-mode가 있다. 여기서, service-flow는 공정 장치 내부에 흐르는 물질이며, failure-mode는 leak나 rupture와 같이 기계적으로 발생할 수 있는 고장을 의미한다. Valve와 같은 stationary equipment에서의 status는 밸브의 개/폐 유무를 나타내는 속성변수이다. 반면에 동력을 사용하는 rotating equipment의 status는 현재의 공정장치가 작동하고 있는지의 여부를 나타내는 속성변수이다. Rotating equipment의 status는 power-on이라는 값이 초기화되어 있다. 이것은 동력을 사용하는 장치들이 정상적인 작동상태에서 항상 동작하고 있기 때문이다. 공정 장치의 하부 객체인 rotating과 stationary equipment는 flow, temperature, pressure 속성변수를 가지게 된다. Tank에 속하는 객체는 위와 같은 기본적 속성변수 이외에도 level과 같은 속성변수를 가지게 된다.

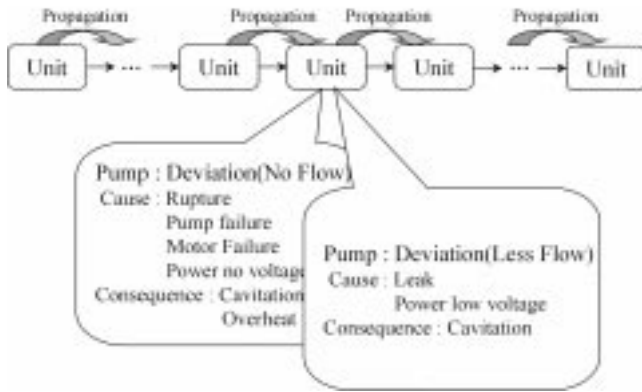


Fig. 6. Unit malfunction knowledge for pump.

### 3.3. Unit malfunction knowledge

Unit malfunction knowledge에는 장치의 이상에 따른 cause와 consequence들이 정의되어 있고 대상공정의 구조와 무관하게 각 장치별로 모델링되어 있어 다양한 공정에 적용 가능하다. 예를 들어, Fig. 6의 펌프에 대해 살펴보면, 펌프에 'No flow'란 이탈의 원인은 'No power', 'motor failure'이고, 'Less flow'와 'No flow'는 'pump cavitation', 'pump overheat'의 결과를 일으키는 주원인이 된다.

## 4. 이탈 전파

대상 공정의 전체 task를 charging, reaction, discharge step으로 세분화한 후, 각 step과 연관되어 있는 연속 변수와 불연속 변수를 구분하여 이탈을 전파시키고 각 장치와 조작에 의해 발생 가능한 이탈과 연관된 연속 변수로 이탈을 전파시킨다.

### 4-1. 유사 연속(pseudo continuity)

회분식 공정에서 charge step과 discharge step은 장치의 입/출력포트(port) 통한 장치사이의 이동만 존재할 뿐 반응이나 그 외 불연속적인 요소가 존재하지 않으므로 연속 공정에서의 이탈 전파법을 적용할 수 있으므로 이 단계를 유사연속 단계로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 부호 유량그래프에서 도출된 전파식을 이용하여 장치들 사이의 공정변수의 이탈을 전파시킨다.

Charge/discharge step 내에서는 여러 가지의 물질 line이 존재할 수 있으나 각 물질의 charge/discharge line 내에 존재하는 공정 구성 장치인 valve, pump 등이 서로 유사하여 장치가 중복되는 것을 막기 위해 대표적인 line만 고려한다(Fig. 7). 또한 물질의 특성상 운전 중 고온·고압의 위험성, 휘발성, 독성 등의 위험성이 발생할 가능성이 있는 물질의

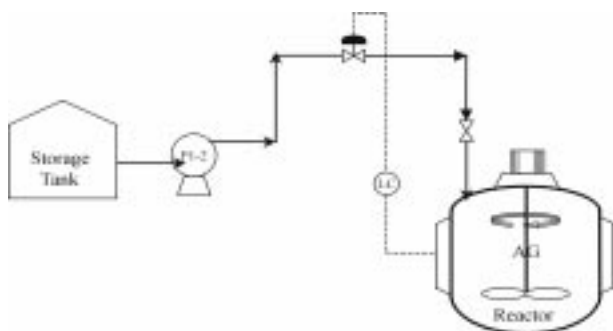


Fig. 7. The charge line of raw material.

$$\begin{aligned} T &= f(T_{in}) & (1) \\ T_{out} &= f(T, T_{in}) & (2) \\ L &= f(Q_{in}, Q_{out}) & (3) \\ Q_{out} &= f(L, P, Q_{in}) & (4) \\ P &= f(L, T, P_{in}) & (5) \\ P_{out} &= f(P_{in}, P) & (6) \end{aligned}$$

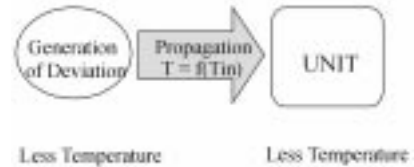


Fig. 8. Propagation equations.

Charge/Discharge line에 대해서는 물질 특성 library를 이용하여 그 위험성을 평가한다.

이탈이 전파되는 매개체에 따라 적용되는 전파식이 결정되는데 물질 흐름에 영향을 받는 flow rate, level, pressure의 이탈은 물질 수지를 참조하고, 장치들의 접촉면으로 이동하는 열에 의해 영향을 받는 temperature의 이탈은 에너지 수지를 참조하여 정성적인 전파식(propagation equation)을 구성한다. 예를 들어, 적용되는 전파식은 Fig. 8과 같으며, 그 의미는 다음과 같다.

- (1) 공정장치 내의 온도는 열량을 공급하는 유체의 온도에 비해한다.
- (2) 유출되는 유체의 온도는 공정장치 내의 온도에 비해하고, 열량을 공급받는 유체의 온도에 비해한다.
- (3) 공정장치 내의 level은 유입되는 유체의 유속과 유출되는 유체의 유속의 차에 비해한다.
- (4) 유출되는 유체의 유량은 공정장치 내의 level, 압력, 유입되는 유체의 유량에 비해한다.
- (5) 공정장치 내의 압력은 level, 온도, 유입 유체의 압력에 비해한다.
- (6) 유출되는 유체의 유압은 공정장치 내의 압력과 유입되는 유체의 압력에 비해한다.

### 4-2. 불연속성(discontinuity)

회분식 공정의 특징인 시간 개념의 불연속성을 고려하여 이탈을 전파시키기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려한다.

- (1) Task 수행시 운전자의 오조작
- (2) Reactor 주변 보조장치의 고장 및 결함
- (3) Charge step과 reaction step 간의 불연속
- (4) Reaction step과 discharge step 간의 불연속

#### 4-2-1. Task 수행시 운전자의 오조작으로 인한 이탈 전파

Reaction step 내에서의 불연속 변수의 이탈은 task 수행시에 운전자의 오조작으로 발생하는 것으로 시간 개념의 변수와 guideword의 조합으로 표기하며, reaction step내의 주 장치인 반응기 내에서 발생 가능한 변수의 이탈은 table로 정리한 후 이러한 변수의 이탈로부터 다른 공정변수로 전이 가능한 이탈의 형태를 database화한다. 예를 들어, 고분자 중합공정의 reaction step 내의 필수 task인 agitate에서 오조작으로 인한 이탈의 전파 과정을 보면, 다음과 같다. 여기서, TAI는 agitation을 시작하는 time을 뜻한다.

- 예) No TAI(Agitating start time)  
→ 반응기 내 More Temp. 이탈 발생

**Table 4. Deviation resulted from operator's maloperation**

Reaction type	Process variable (operating time)	Guideword	The transition toward the process variable deviation in the reactor of the reaction step			
			Temp.	Press.	Conc.	Other
Exothermic	TCi(cooling-start-time)	Less	Less	Less	Less	
		More	More	More	More	Fire
	TCt(cooling-stop-time)	Less	More	More	More	Fire
More		Less	Less	Less		
Endothermic	THi(heating-start-time)	Less	More	More	More	Fire
		More	Less	Less	Less	
	THt(heating-stop-time)	Less	Less	Less	Less	
		More	More	More	More	Fire

→ 반응기 내 More Press. 이탈 전이  
 → 반응기 내 생성 물질 More Conc.  
 → More Temp.로 인해 Fire hazard 발생

Less(Early) TAI(Agitating start time)

→ 반응기 내 Less Temp. 이탈 발생  
 → 반응기 내 Less Press. 이탈 전이  
 → 반응기 내 생성 물질 Less Conc.

More(Late) TAI(Agitating start time)

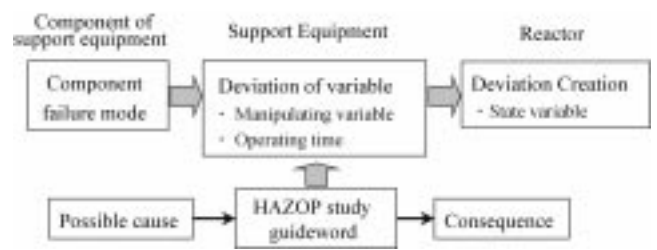
→ 반응기 내 More Temp. 이탈 발생  
 → 반응기 내 More Press. 이탈 전이  
 → 반응기 내 생성 물질 More Conc.  
 → More Temp.로 인해 Fire hazard 발생

마찬가지로 reaction step 내의 필수 task로는 고온 steam이나 전기로써 유체를 가열시키는 단계인 heating task와 coolant로써 유체를 cooling시키는 단계인 cooling task가 있다. 이와 같은 task의 수행 중에 조작시간과 관계된 오조작으로 인해 reactor 내에서 발생 가능한 공정 변수의 이탈을 발열과 흡열반응에 따라 구분하여 table화하면 Table 4와 같다.

#### 4-2-2. Reactor 주변 보조장치의 고장 및 결합에 의한 이탈 전파

Reaction step에서 반응기 내의 반응이 안전하게 수행되고 제품의 생산이 원활하게 되기 위해 반응기 주변에는 여러 보조 장치들이 존재한다. 그런데 이러한 주변 장치들의 기능이 제대로 수행되지 않을 때는 정상 상태로 존재하던 반응기 내의 공정변수들에 이탈이 발생한다.

예를 들어, 보조 장치인 cooling system을 보면 coolant tank, valve, pump 등 다양한 장치들이 존재하는데 만일 이러한 장치 중에서 어느 하나의 장치에 고장이 발생할 경우, 반응기 내의 공정변수에 이탈이 발

**Fig. 9. Equipment malfunction(reaction step).**

생한다(Fig. 9).

4-2-3. Charge step과 reaction step 간의 불연속성에 의한 이탈 전파  
 변수의 이탈 전파는 부가적인 기능을 하는 장치(cooling unit, heating unit, agitation unit 등)와 관련이 없을 경우, 모든 이탈은 원래의 이탈 그대로 전파된다. 변수의 이탈 전파시 각 변수의 상호 관계에 의해 다음과 같은 추론을 할 수 있다.

- → - : 가능  
 + → + : 가능  
 + → - : 불가능  
 - → + : 불가능

예를 들어, 임의의 장치에 'More Temp.'이란 이탈을 전파시킬 경우, cooling task의 수행을 고려하지 않으면 다음 장치로 'More Temp.'가 그대로 전파된다.

Charge step과 reaction step 간의 불연속적인 공정 변수 이탈 전파를 위해 장치 중심의 이탈 전파법을 적용하여 charge step의 마지막 장치인 pipe 내의 공정 변수 이탈을 reaction step의 주 장치인 반응기 내의

**Table 5. The transition table of the process variable deviation between charge step and reaction step**

The process variable in the pipe of the end of the charge line		Guideword	The transition toward the process variable deviation in the reactor			
			Level	Press.	Temp.	Conc.
Flow rate	Hot material line	No	No	Less	Less	No
		Less	Less	Less	Less	Less
		More	More	More	More	More
	Cold material line	No	No	Less	More	No
		Less	Less	Less	More	Less
		More	More	More	Less	More
Temp.		Less		Less	Less	Less
		More		More	More	More
		No		Less	Less	No
Conc.		Less		Less	Less	Less
		More		More	More	More

Table 6. The transition table of the process variable deviation between reaction step and discharge step

Process variable deviation in the reactor during reaction step	Guideword	The transition toward the process variable deviation in the pipe of the end of the discharge line		
		Flow	Temp.	Conc.
Level	No	No		
	Less	Less		
	More	More		
Press.	Less	Less	Less	
	More	More	More	
Temp.	Less		Less	
	More		More	
Conc.	No			No
	Less			Less
	More			More

공정 변수 이탈로 전파시킨다(Table 5). 이때 pipe의 여러 공정변수 중에서 Q, T, C만을 고려하고, 반응기는 L, T, P, C만을 고려한다.

Table 3에서 보는 것과 같이 반응기로 투입되는 여러 물질 중에서 비교적 고온의 물질이 있는 charge line 내에서 'More Flow rate'란 이탈이 발생할 경우, 반응기 내에는 'More Level'의 이탈이 발생하게 되고 전체 반응물 중에서 고온 물질의 유속이 정상 유속보다 크므로 에너지 수지에 의해 반응기 내에는 'More Temp.'의 이탈이 발생하여 반응기 내 온도는 정상 온도보다 높게 될 것이고, 이로 인하여 'More Press.'로 이탈이 전이되게 된다.

4-2-4. Reaction step과 discharge step 간의 불연속성에 의한 이탈 전파 앞에서 언급한 charge step과 reaction step 간의 불연속적인 변수의 이탈 전파와 마찬가지로 reaction step에서의 주 장치인 반응기와 관련 있는 공정 변수(L, T, P, C) 이탈을 discharge step내의 첫 장치인 pipe와 관련 있는 공정 변수(Q, T, C) 이탈로 전파시킬 수 있으며 그 관계는 Table 6과 같다. 예를 들어, reaction step에서 반응기내의 'More Temp.'의 이탈이 발생할 경우, discharge step의 첫 장치인 pipe 내 생성물의 온도는 'More Temp.'란 이탈이 발생하게 된다.

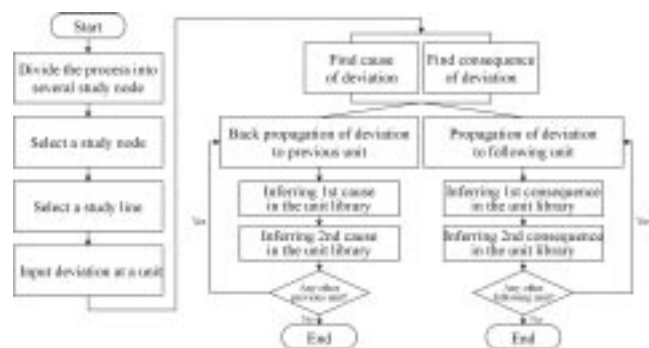


Fig. 10. Batch HAZOP analysis procedure.

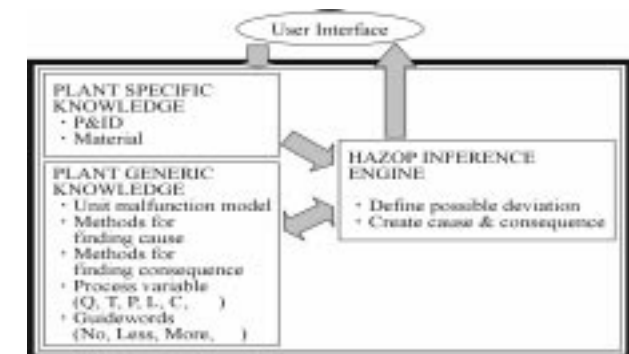


Fig. 11. Basic architecture of the HAZOP System.

## 5. 지식 기반 전문가 시스템

회분식 공정의 HAZOP 분석 전문가 시스템의 개발 목적은 HAZOP 분석에 관한 일련의 과정을 자동화하여 이탈의 원인과 결과를 사용자에게 제시하는 것이다. 즉, 선택된 step, line, 장치에서의 어떤 이탈이 사용자에게 의해 입력되면, 선택된 이탈이 다른 장치로 전파된 후, 추론 엔진에 의한 해석을 거쳐 data-base화되어 있는 장치의 이상 지식과 연결되어 원인과 결과가 도출된다(Fig. 10).

시스템의 구조는 user interface, plant specific knowledge, plant general knowledge, HAZOP inference engine으로 구성되어 있다(Fig. 11).

User interface는 사용자가 시스템에 직접 접근하는 부분으로 사용자로 하여금 이탈을 선택하도록 일정한 frame을 제시하고 선택된 이탈에 대한 HAZOP 분석을 수행하여 추론된 원인과 결과를 사용자에게 출력해주는 역할을 한다.

Knowledge base는 일반적인 공정지식(plant general knowledge)과 공정의 특정 지식(plant specific knowledge)으로 나누어 관리함으로써 다른 공정의 적용에 매우 유용하다. 일반적인 공정지식은 장치별로 정리된 일반적인 이상 지식과 장치 속성 지식, 원인/결과 탐색법, 가이드워드, 공정 변수 등이 있고, 공정의 특정 지식에는 물성 data, P&ID 등이 있다. Knowledge base를 일반 지식과 특정 지식으로 나누어 정리함으로써 관련 있는 지식만 수정, 삭제, 추가할 수 있어 시스템이 매우 유연해질 뿐 아니라 knowledge base의 크기를 줄일 수 있다.

HAZOP inference engine은 matching 기법으로 이탈이 발생한 line을 규명하여 이탈을 전파시킨 후, if-then rule을 사용하여 전파된 이탈을 해석하고 장치 이상 지식 라이브러리와 대상 공정의 연결 구조를 고려하여 해당 이탈에 대한 원인과 결과를 추론한다.

## 6. Case Study

본 연구에서 사용하는 Latex 제조공정은 현 산업체에서 사용되고 있는 전형적인 회분식 공정으로 운전 메뉴얼에 따라 monomer 및 chemical들을 reactor에 charging한 후, 회분식 유화 중합 반응으로 제품을 생산한다(Fig. 12).

유화 중합 반응은 styrene, butadiene 등의 monomer에 유화제, 중합개시제, 전해질, 분자량 조절제 등을 투입하여 일정한 온도 하에서 일정 시간 교반하여 유화시켜 radical 중합을 하는 방법이다. AN(acrylonitrile), ST(styrene), BD(butadiene)와 같은 monomer들과 그 외의 다양한 chemical들이 유화 중합 반응을 위한 물질들로 이용되고, liquid NH<sub>3</sub>로써 온도를 제어한다. 반응 조건으로 온도는 85 °C 이하, 압력은 5.0 kg/cm<sup>2</sup>G 이하로 유지되어야 한다.

Latex 공정은 운전절차에 따라 monomer/chemical storage step, chemical

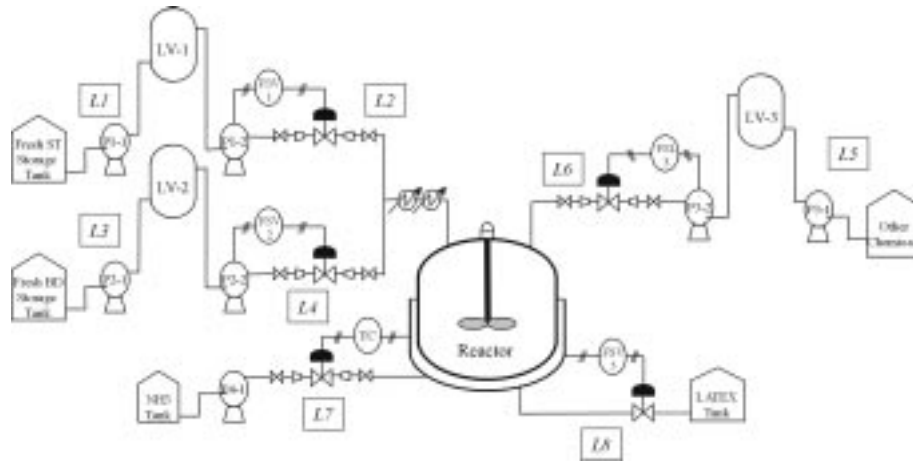


Fig. 12. Study process(Latex process).

preparation step, charge/polymerization step, monomer recovery step, latex storage & ending step, finishing step의 여섯 개의 부분으로 구성되어 있으며, 본 연구에서는 charge/polymerization step 중심으로 분석을 수행할 것이다.

Charging/polymerization step을 세부적으로 보면 monomer/chemical charging step과 reaction step으로 구분된다. 물질 채류가 가능한 vessel과 vessel 간의 pipeline을 분석점으로 하여 각 분석점 내에 존재하는 임의의 장치에 공정 변수 이탈을 발생시킨 후, 물질 흐름 방향의 연결 장치로 이탈을 전파시키고 각 장치에서 발생한 공정 변수 이탈과 장치들의 unit malfunction knowledge를 이용하여 최종 결과를 도출한다.

우선, 연속 변수 flow rate와 가이드워드 No를 조합하여 이탈 'No Flow rate'를 생성시킨다. 이것을 Fig. 12와 같이 reaction step에서 반응기의 온도 제어에 관한 보조 task를 수행하는 line 7의 공정 장치인 pump p4-1에 적용시킨다. 이탈이 발생한 장치의 이탈 결과를 찾기 위해 plant generic knowledge 중에서 unit malfunction knowledge를 이용하여 'No Flow rate'로 발생 가능한 결과와 'No Flow rate'를 일으킨 원인을 찾고 이탈이 발생한 장치에 대한 이탈 발생 원인과 결과를 분석한 후, 다음 장치인 pipe로 이탈을 전파시킨다. 이탈의 전파는 propagation equation을 이용하여 pipe에 발생 가능한 이탈을 추론하되 pipe와 관련 있는 공정 변수인 flow rate, temperature, concentration 중에서 현재 고려 중인 변수 flow rate와 직접 관련이 있는 공정 변수인 flow rate만 고려한다. Propagation equation에서  $Q_{out} = f(L, P, Q_{in})$ 을 이용할 때, 이탈을 발생시켜 분석 중인 하나의 공정 변수를 제외한 나머지 공정 변수는 정상 상태를 유지하므로 위 propagation equation의 변수인 level, pressure는 이탈 전파시 고려하지 않는다. 따라서 출력되는 공정 변수 flow rate는 입력되는 공정 변수 flow rate에 의해서만 영향을 받으므로 pipe를 통하여 출력되는 공정 변수인 flow rate는 그대로 'No Flow rate'의 이탈을 유지한다. 이때 line 내의 제어장치인 control valve는 정상적으로 작동한다고 가정한다.

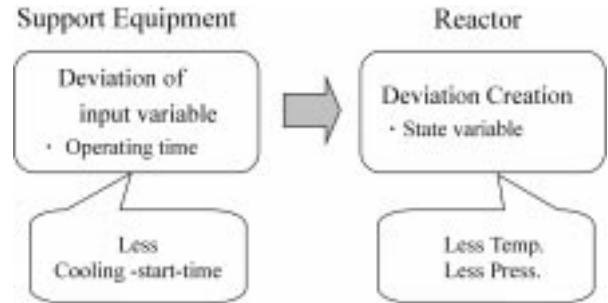


Fig. 13. The study of the support equipment malfunction.

반응기의 보조 system인 cooling system 내에서는 장치 고장이나 조작자의 오작동 등으로 인한 이탈을 발생시킬 수 있는데 이러한 이탈로 인해 직접적인 영향을 받는 것은 reaction step 내에 있는 반응기이다. Reaction step 내의 주 장치인 반응기의 상태에 직접적인 영향을 미치는 부가적인 task, 오작동, 그리고 반응기 내의 상태 변수와의 관계를 모든 경우에 따라 table로 한 후, knowledge base를 참조하여 이탈의 결과와 원인을 도출한다(Table 7).

공정 변수의 이탈에 의한 것 뿐만 아니라 reaction step의 cooling system 조작 중에 운전자의 직접적인 조작으로 인한 이탈이 있을 수 있다. 예를 들어, 불연속 변수 cooling-start-time(TC)와 가이드워드 Less(early)의 조합으로 이탈 'Less cooling-start-time'이 발생할 경우, 이로 인해 반응기 내의 상태 변수로 전파 가능한 공정 변수의 이탈은 'Less Temp.'이며, 또한 'Less Temp.'로 인해 전이 가능한 공정 변수 이탈은 'Less Press.'이다. 이러한 방법으로 추론된 결과는 장치의 이상 지식을 참조하여 이탈로 인한 최종적인 결과를 도출한다(Fig. 13).

## 7. 결 론

회분식 공정의 HAZOP 분석 과정을 자동화하기 위해서 객체지향 프레임 기반 구조와 규칙 기반 전문가시스템의 추론 방법을 이용한 지식 기반구조를 개발하여 분석에 필요한 지식을 효율적으로 표현하고 이탈의 원인과 결과를 사용자에게 제시해 주는 시스템을 구축하였다.

회분식 공정의 HAZOP 분석은 연속식 공정과는 달리 조작 시간, 순서 등에 의한 이탈과 운전자의 오작동에 의한 이탈을 고려해야 된다. 즉, 회분식 공정의 주요 step은 charging step, reaction step, discharging step으로 분류할 수 있다. 여기서는 물질의 입/출력에 관한 charging step,

Table 7. The causal table of the deviation(coolant in the reaction step)

Cause	Deviation	Consequence
Line plugged	No Flow rate	More Temp.(in the reactor)
pump stroke too short		More Press.(in the reactor)
valve insufficiently open		Less Product
coolant tank level less		
operator miss operator		

discharging step은 연속 공정과 동일한 propagation equation을 사용하여 이탈을 전파시켜 분석하고, reaction step에서는 운전자의 불연속적 조작을 고려하여 각 task 수행 시에 발생하는 오조작이나 reactor의 보조 장치 내 equipment의 고장으로 인해 발생 가능한 모든 연속 변수 이탈을 열거하여 table화한 후, charging step, discharging step과 같이 연속적인 면을 고려하여 장치간의 이탈을 전파시킨다.

이러한 회분식 HAZOP 분석 시스템은 설계 과정에서 안전성 검토 및 이미 사용되고 있는 공정의 위험성 분석에 사용할 수 있다. 향후에 여러 가지의 자동화시스템과 Plant SHEMA와 같은 기존의 엔지니어링 데이터 베이스와의 효율적 연계가 이루어지면 보다 손쉬운 회분식 공정의 HAZOP 분석이 가능하리라고 사료된다.

### 참고문헌

1. Hwang, K. S., Tomita, S. and O'shima, E.: *Kagaku Kogaku Ronbunshu*, **14**, 728(1988).
2. Hwang, K. S., Tomita, S. and O'shima, E.: *Int. Chem. Eng.*, **31**(1991).
3. Kang, Soon-Jung and Kwon, Hyuck-Myun: *Theories and Applications of Chem. Eng.*, **2**, 3111(1996).
4. Lakshmanan, R. and Stephanopoulos, G.: *Comp. Chem. Eng.*, **12**, 985 (1988).
5. Lakshmanan, R. and Stephanopoulos, G.: *Comp. Chem. Eng.*, **12**, 1003 (1988).
6. Lakshmanan, R. and Stephanopoulos, G.: *Comp. Chem. Eng.*, **14**, 301 (1990).
7. Leone H.: *Comp. Chem. Eng.*, **20**, 369(1996).
8. Li, H. S., Lu, M. L. and Naka, Y.: *Comp. Chem. Eng.*, **21**, 899(1997).
9. Naka, Y., Lu, M. L. and Takiyama, H.: *Comp. Chem. Eng.*, **9**, 997 (1997).
10. Nimmo, I.: *Chem. Eng. Prog.*, **10**, 32(1994).
11. Ok, Y.-Y., Hou, B.-K. and Hwang, K.-S.: *KIGAS*, **3**, 34(1999).
12. Rivas, J. R. and Rudd, D. F.: *AIChE J.*, **20**, 311(1974).
13. Rivas, J. R. and Rudd, D. F.: *AIChE J.*, **20**, 320(1974).
14. Rostein, G. E., Lavie, R. and Lewin, D. R.: *AIChE J.*, **40**, 1650(1994).
15. Srinivasan, R. and Venkatasubramanian, V.: *Comp. Chem. Eng.*, **22**, 1345(1998).
16. Vaidhyanathan, R. and Venkatasubramanian, V.: *Reliability Eng. & Safety*, **50**, 33(1995).