

HAZOP 분석 자동화를 위한 객체지향 모델링

Object-Oriented Modelling for Automated HAZOP Analysis

이진명* · 허보경* · 황규석*
 J.M. Lee · B.K. Hou · K.S. Hwang
 (1997년 12월 19일 접수, 1998년 2월 27일 채택)

ABSTRACT

Hazard and operability (HAZOP) analysis is one of the safety analysis method that is used in the chemical complex, because it can systematically identify causes and consequences of all the deviation that could occur. Since this method needs to hire specialized experts, it is costly and time-consuming. Therefore HAZOP Expert System has been developed to automate this analysis. This approach introduced object-oriented method and knowledge representation which is hierarchical tree of units to supply flexibility in the system, functional semantic network, propagation equation and rule-chaining method to set up the expert system for automating HAZOP analysis.

1. 서론

화학공장에서 사고 발생시, 그로 인한 피해의 광범위함과 치명적인 결과로 인하여 공정 안전 관리(process safety management, PSM)를 위한 위험성 평가기법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

그 중에서도 위험과 운전성 분석기법인 HAZOP¹⁾은 공정의 발생가능한 모든 위험성 발견과 사고의 원인을 확인, 사고를 방지하기 위한 대

응책을 제시하고 조업성을 검토하여 공정운전상에 발생할 수 있는 모든 문제에 대하여 대처할 수 있도록 한다.

HAZOP은 가능한 모든 분석을 다루어야 하는 작업이므로 중복된 분석이 발생하며 많은 시간과 비용이 요구된다. 또한 대상에 대한 전문적 지식을 요하기 때문에 분석하는 사람의 지식 수준에 따라서 다른 결과가 나오므로 객관적인 신빙성을 확보할 수 있는지 장담할 수 없다. 따라서 이러한 단점을 극복하기 위해서는, 공정지

* 부산대학교 화학공학과

식의 정형적(formal) 획득과 표현방법이 개발되어야 하며 HAZOP 분석과정을 자동화해야 한다.

본 연구에서는 HAZOP 분석을 자동화하기 위한 전문가 시스템(expert system)을 개발하기 위하여 객체지향 모델링과 지식 추론기법에 관한 연구를 수행하였으며, 이를 통하여 대상공정 내에서 발생가능한 모든 사고와 발생 원인을 밝히고 대처방안을 제시하고자 한다.

2. HAZOP 분석 절차

HAZOP 기법은 대상공정 내 특정부분에 임의의 이탈을 발생시켜, 그에 대한 모든 원인파 결과를 규명하여 사고의 발생을 미연에 방지하는 것을 그 목적으로 한다(Fig. 1, Fig. 2).

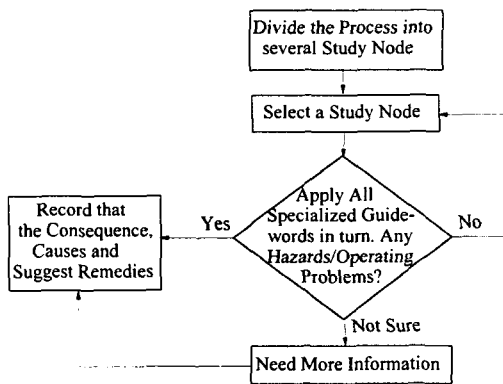


Fig. 1 Algorithm of HAZOP Study

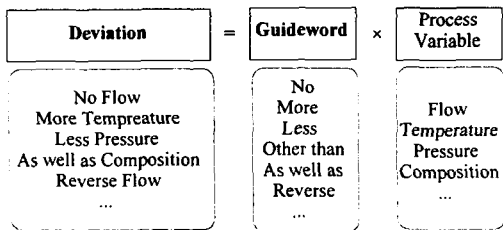


Fig. 2 Formation of Deviations

화학공정은 물질의 흐름에 의해서 공정변수의 이탈에 대한 영향이 상부흐름(upstream)에서 하부흐름(downstream)으로 미치므로, 이탈에 대

한 원인은 상부흐름에서 찾을 수 있고 결과는 하부흐름에서 찾을 수 있다.

이때 발생한 이탈에 대한 원인과 결과를 찾기 위해서는 이탈을 전파(propagation), 역전파(backpropagation) 시킬 수 있는 전파식(propagation equation)^{3,5)}이 필요하다(Fig. 3).

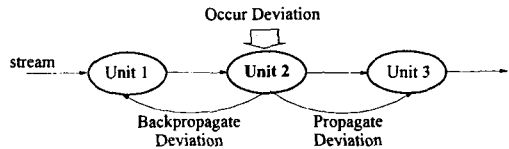


Fig. 3 Propagation/Backpropagation of Deviation

장치에서의 이탈 발생 원인을 찾기 위한 이탈에 대한 역전파의 최종 단계는 공정 내 물질 흐름을 유발하는 공급원 장치(source unit)까지 이루어지며, 이탈에 대한 결과를 찾기 위한 전파는 전파 중 이탈이 소실되거나 물질의 흐름 상 마지막 장치가 될 때까지 행한다(Fig. 4).

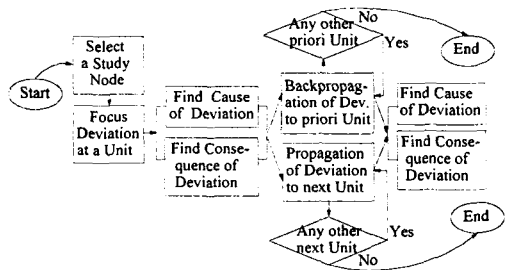


Fig. 4 HAZOP Analysis Procedure

3. 지식기반 프레임워크

전문가시스템의 지식기반 프레임워크(knowledge-based framework)는 사용자 인터페이스(user interface), 추론 엔진(inference engine)과 지식기반으로 구성된다(Fig. 5).

지식기반을 공정의 일반적(general) 지식과 공정 특유(specific) 지식으로 분류하여, 대상공정이 바뀔 경우에 공정 특성에 해당하는 사항을 추가하거나 수정함으로써, 다른 몇 개의 대상공정에 대해서도 HAZOP 분석을 실행할 수 있다²⁾.

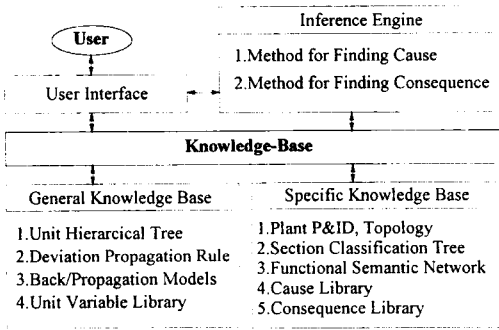


Fig. 5 Knowledge-Based Framework

공정의 일반적 지식은 일반적으로 대부분의 화학 공정에 적용되는 지식으로써, 장치에 관한 지식을 객체적으로 관리한 장치 계층 트리(unit hierarchical tree)와 한 장치의 이탈이 하부흐름과 다른 장치에 미치는 영향의 정도를 If-Then 룰로 나타낸 이탈 전파 룰(deviation propagation rule)이 있다.

공정 특유의 지식은 다른 화학공정과 차이를 갖는 HAZOP 분석 대상공정만의 특성에 해당하며, P & ID와 장치에서의 이탈에 대한 정성적인 거동 특성과 발생할 수 있는 사고에 대한 지식들, 즉 공정을 기능 중심의 관점에서 분할한 영역별 분류 트리(section classification tree), 기능 중심으로 분할된 영역과 각 장치들 간의 기능적 인과 관계를 나타내는 기능 의미네트워크(functional semantic network)가 있다.

임의의 장치에서 이탈 발생시 전파식과 역전파식을 사용한 이탈의 정성적 전파와 역전파로, 한 장치에서 발생한 이탈이 파급하는 영향과 그 원인을 추론한다. 전파식과 역전파식은 장치에서 이탈의 정성적 거동특성을 나타내는 식으로써, 입/출력 공정물질과 공정변수로 표현된다.

추론 엔진은 원인 추론기와 결과 모사기로 구성되며, 이상에서 나열한 지식들을 바탕으로 주어졌던 룰을 이용하여 모사를 행하여 장치에서 이탈이 발생한 것에 대한 원인과 결과를 추론한다.

이탈이 전파될 때마다 이탈 발생에 대한 구체적인 원인과 결과를 규명하기 위해, 이탈의 전파/역전파와 동시에 그 결과를 원인-결과 라이브러리(cause-consequence library)에서 검색

하여 찾아내는 작업을 반복한다.

각각의 장치마다 전파와 역전파를 실행하며 원인/결과를 규명하는 과정을 반복하면서 HAZOP 분석을 실행하면, Fig. 6과 같이 앞장치에서의 이탈에 대한 결과가 뒤장치의 원인이 되고 뒤장치의 원인이 앞장치의 결과가 되어 꼬리에 꼬리를 무는 형식으로 서로 밀접한 연관성을 가지게 되어, 한 장치에서 발생한 이탈이 다른 장치와 공정에 미치는 영향을 명시적으로 규명할 수 있다.

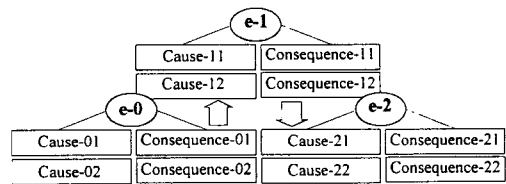


Fig. 6 Cause/Consequence Series

4. 시스템 개요

Fig. 7의 시스템 개요를 살펴보면, HAZOP 분석을 실행할 절차 중 가장 첫 번째 단계로써 플랜트 중 분석을 실행할 공정을 결정하게 되는데, 이때 지식 기반 중 대상 공정을 몇 개의 영역으로 분류한 영역별 분류트리가 필요하다.

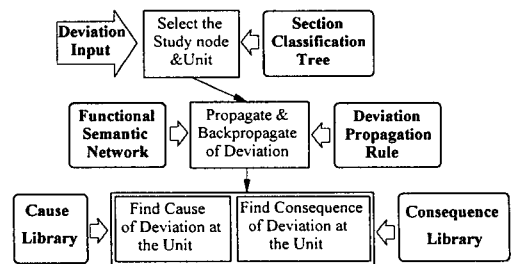


Fig. 7 System Scheme

입력된 공정의 연결 구조(topology)와 P & ID를 통하여 물질 흐름 방향과 장치의 순서를 알 수 있으므로, 이탈이 전파/역전파될 장치를 찾는다. 장치가 결정되면 발생한 이탈에 대한 전파와 역전파를 하게 되는데, 이것은 추론엔진에서 룰로 표현된 전파식/역전파식에 의해서 행

해지며 전과/역전과 과정에서 장치의 중요도와 영향력에 따라 발생한 이탈이 다른 장치와 공정에 미치는 효과가 달라질 수 있다.

어떠한 장치들은 공정 내에서의 그 장치의 역할의 중요도에 의해서 그 장치에 이탈이 발생했을 시 다른 장치나 공정 자체에 크나큰 위험을 초래하게 될 수 있다. 이러한 공정 내에 미치는 영향력이 큰 장치를 일컬어 중추 장치(pivotal unit)라 한다.

기능 의미네트워크에 표현된 공정 간의 인과관계에 의해 한 장치에서 발생한 이탈이 다른 공정에 야기하는 영향을 추론할 수 있다.

앞에서 설명한 지식들 즉, 이탈 전과 물, 기능 의미네트워크를 이용하여 이탈의 전과를 행하면, 화학 플랜트 내 임의의 한 공정에서 발생한 이탈이 그 공정과 기능적으로 상관하는 다른 공정들과 중추 장치, 다시 그 중추 장치와 상관하는 또다른 중추 장치 등 나아가 플랜트 전체에 까지 이탈이 전과되는 과정과 그에 대한 위험의 전개를 체계적으로 규명할 수 있다.

따라서 수작업으로 HAZOP 분석을 실행할 때 미처 추론하지 못한 결과까지도 찾음으로서 위험가능성에 대한 세밀한 분석이 가능하고, 이탈의 원인 제공 가능성이 반드시 공급원 장치만이 아니라 이탈 발생 장치의 앞 단계에 해당하는 모든 장치에 존재한다는 가정하에 원인을 탐색하게 되므로 세부적인 원인까지 찾아낼 수 있다.

5. 지식 기반의 표현

본 연구에서 대상 공정으로하는 보일러 플랜트는 화학 플랜트의 중요한 유틸리티로써, 여기에 이상이 발생했을 시 화학 플랜트 전체에까지 치명적인 위험을 야기할 수 있다. 따라서 보일러 플랜트의 안전성 평가는 매우 중요하고 정밀성이 요구되어진다(Fig. 8).

5.1 공정의 영역별 분류

HAZOP 분석을 하기 위하여 플랜트를 기능 중심적인 관점에 입각하여 분류하여 트리를 구축하였다. 본 연구에서 대상 공정이 되는 보일러

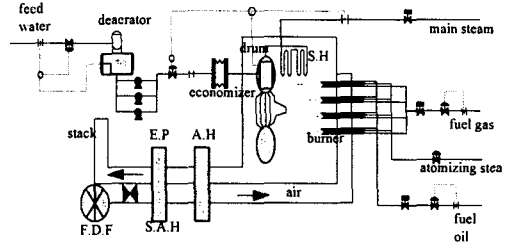


Fig. 8 Boiler Plant

플랜트는 물질이 공급되는 공정과 그 공정의 중추 장치 등을 중심으로 13개의 기능영역으로 분류하였다.

- 1) 공급수 라인(feed-water-line)
- 2) 공기 흐름 라인(air-flow-line)
- 3) 연료 공급 라인(fuel-supply-line)
- 4) 점화 가스 라인(ignition-gas-line)
- 5) 분무 증기 라인(atomizing-steam-line)
- 6) 연소 가스 라인(flue-gas-line)
- 7) 점화기(ignitor)
- 8) 버너(burner)
- 9) 로(furnace)
- 10) 스팀 드럼(steam-drum)
- 11) 워터 드럼(water-drum)
- 12) 과열기(superheater)
- 13) 스팀 출구 라인(steam-output-line)

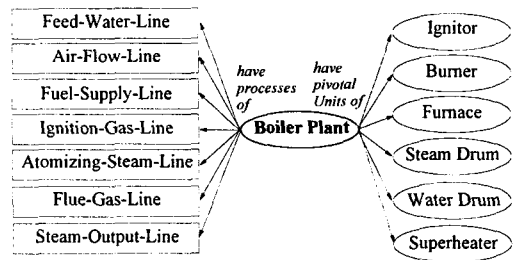


Fig. 9 Section Classification Tree

보일러 플랜트의 13개의 공정 중 플랜트 내에 물질을 공급하는 공정으로는 공급수 라인, 공기 흐름 라인, 연료 공급 라인, 점화 가스 라인, 분무 가스 라인, 연소 가스 라인이 해당되고, 이 중에서 플랜트에 물질을 공급하는 공정으로는 스팀 출구 라인이 해당되며, 공정에서 이탈 발생시 그에 대해 전과하는 과정에서 이탈이 가

장 민감한 증추 장치에는 점화기, 버너, 로, 스팀 드럼, 워터 드럼, 과열기가 있다(Fig. 9).

5.2 공정 간의 기능적 인과관계

기존의 연구 방법에서 사용된 변수 중심의 공정모델링 방법(e.g. SDG)⁴⁾에 기능중심의 공정 모델링 방법인 기능 의미네트워크를 도입함으로써, 각 공정간의 인과 관계를 고려하여 위험이 어떻게 전파되는지를 쉽게 유추할 수 있다.

Fig. 10은 보일러 플랜트의 13개 공정들의 기능 의미네트워크로써 사각형으로 표시된 부분은 플랜트 내로 물질이 공급되는 공정이고, 타원으로 표시된 부분은 사각형으로 표시된 공정의 증추 장치이다. 각 부분들의 연결선은 장치와 장치, 장치와 공정, 공정과 공정간의 상관 관계를 나타낸다.

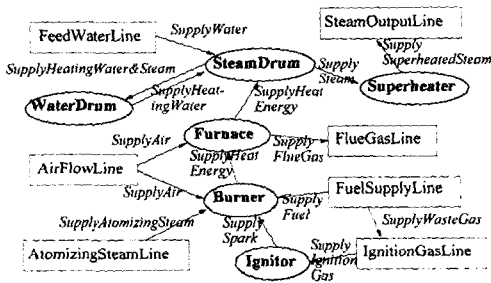


Fig. 10 Functional Semantic Network

공급수 라인 내의 한 장치에 이탈이 발생했다고 가정하면, 공급수 라인 내의 장치들에 순차적 전파가 진행되어 공급수 라인과 기능적 인과관계를 가지는 증추 장치인 스팀 드럼까지 전파된다. 기능 의미네트워크에서 가리키는 화살표의 방향에 따라 스팀 드럼과 인과 관계를 가지는 또 다른 증추 장치인 워터 드럼, 과열기에도 이탈이 전파되는 것을 유추할 수 있으며, 과열기에 전파된 이탈은 스팀 출구 라인까지 전파되어 보일러 플랜트 뿐만 아니라 화학 플랜트 전체에까지도 위험이 초래됨을 유추할 수 있다.

5.3 공정 장치의 계층 구조

장치를 분류하는데 있어서, 공정 내의 물질과

장치의 역할을 포괄적으로 고려하여 공급원 장치(source unit), 제어장치(control unit), 저장 장치(storage unit), 수송장치(transfer unit)의 최상위클래스를 가지는 트리를 구축하였다(Fig. 11).

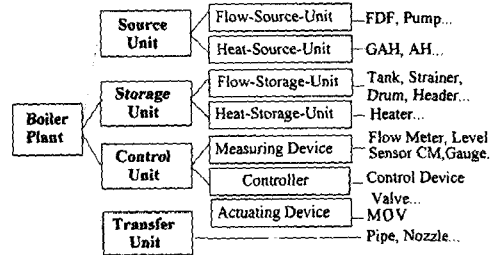


Fig. 11 Unit Hierarchical Tree

각 최상위클래스는 몇 개의 하위클래스로 확장되며, 트리의 최하위클래스는 구체적인 실공정의 구성장치를 나타내는 실례이다.

따라서 대상공정에서 장치의 구성이나 구조가 변경될 경우에는 트리의 실례만 수정하면 되므로, 공정 지식이 체계적으로 관리되어 광범위한 화학 공정에 적용이 가능하다.

이러한 계층 구조 형식으로 각 장치에 객체성을 부여함으로써 대상 공정이나 공정 내 존재 장치의 변경 시 상위 클래스의 지식만 수정하면 하위 클래스의 지식은 자동적으로 수정되며, 최하위 클래스의 지식은 변경되더라도 시스템의 전체의 지식에는 영향을 미치지 않으므로 언제든지 수정이 가능하다는 이점이 있다.

6. 전파, 역전파식

장치에 이탈이 발생 시, 전파식과 역전파식을 이용하여 이탈의 정성적 전파와 역전파를 행하였다. 각 장치의 전파식은 입력공정변수와 출력공정변수의 정성적인 비례관계를 나타낸 식으로써 입력공정변수는 하나 이상이 될 수 있으며, 출력공정변수는 한 개를 원칙으로 한다. 전파식에서 변수의 +/-는 입력변수와 출력변수가 정성적으로 비례관계인지 반비례관계인지를 나타내는 기호이다.

$$\begin{aligned} \text{Dev}(\text{Variable-out}) &= +\text{Dev}(\text{Variable-in}) & (1) \\ \text{Dev}(\text{Variable-out}) &= -\text{Dev}(\text{Variable-in}) & (2) \\ \text{Dev}(\text{Variable-out}) &= \pm\text{Dev}(\text{Variable1-in}) \\ &\quad \pm\text{Dev}(\text{Variable2-in}) & (3) \end{aligned}$$

정성적 평가의 특성에 따라 공정의 흐름이 정상 상태이거나 다른 장치에 아무런 영향력을 가지지 못할 경우에는 기호 "0"으로, 정상상태보다 적은 양이면 "-", 많은 양이면 "+"라고 표현한다. 이탈의 정성적 기호와 가이드워드의 관계는 Table 1과 같으며, 가이드워드가 No일 경우에는 정상상태 기호인 "0"와의 혼란을 방지하기 위하여 "e"라는 기호를 사용한다.

Table 1 Qualitative Symbols of Deviations

symbol	deviation
Dev(variable-in)- e	No Variable
Dev(variable-in)= +	More Variable
Dev(variable-in)-	Less Variable
Dev(variable-in)- 0	Normal State

전파식은 공정에서의 장치의 역할과 입/출력 공정변수의 비례 관계를 고려한 포괄적인 함수이므로, Table 2에서 제공하는 각 장치에서 고려해야 할 물질별 입/출력공정변수에 대한 데이터가 필요하다.

예를 들어 보일러 플랜트의 공기 흐름 라인 내

Table 2 Unit Variable Library (M: material, A: air, F: fuel)

node	Air-Flow-Line																		
	silencer		FDF		inlet damper		GAH		FCD		ignitor		wind box		outlet damper		pipe		
unit	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	A	F	
M																			
Q _{in}	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○
Q _{out}	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○
P _{in}	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○
P _{out}	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○	×	○
T _{in}	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×
T _{out}	×	×	×	×	×	×	○	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×	×

장치 GAH(gas air heater)에서는, 물질중 공기만을 고려하므로 입/출력공정변수는 테이블에서 ○으로 표현된 공기의 Q_{in}, Q_{out}, P_{in}, P_{out}, T_{in}, T_{out}이며, 이때 고려하지 않는 공정변수는 테이블에서 ×로 표현되었다.

보일러 플랜트는 반응보다는 흐름중심의 공정이므로 장치 내에서의 물질의 반응은 고려하지 않았기 때문에, 공정변수는 입력, 출력변수만을 가진다.

장치 변수 라이브러리에서 제공하는 각 장치에서 고려해야 할 공정변수와 물질에 관한 데이터를 바탕으로 공기 흐름 라인 내 장치의 전파식을 세우면 Table 3과 같다.

입의의 장치에서 발생한 이탈의 전파는 하부공정의 연결구조를 바탕으로 전향 추론법을 사용하여, 다음 장치로 한 단계씩 행하며, 이탈을 전파하는 도중에 이탈이 소멸될 경우에는 HA-

ZOP 분석을 완료한다.

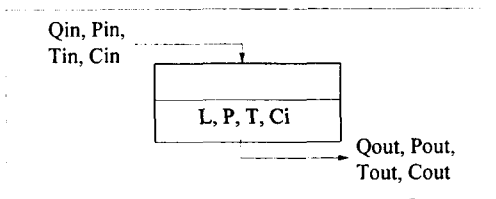
Table 3 Propagation Equations of Air-Flow-Line (subscript a: air, s: steam, w: water)

Unit	Propagation Equation
Silencer	Dev(Q _a -out)=Dev(Q _a -in)
FDF	
GAH	Dev(T _a -out)=Dev(T _a -in)-Dev(Q _a -in)
FCD	Dev(P _a -in)=Dev(Q _a -in)
Damper	Dev(Q _a -out)=Dev(P _a -in)
Furnace	Dev(T _a -out)=Dev(T _a -in)-Dev(Q _a -in)

이탈의 역전파는 전파식에 역함수 개념을 도입하여 상부공정 연결구조에 후향 추론법을 사용하여, 한 단계씩 앞 장치로 이탈을 역전파해서 이탈의 발생을 유도할 수 있는 가능한 모든 원인을 찾는다. 역전파는 이탈이 최초 발생한 장치의 흐름상 앞단계에 해당하는 모든 장치에

행해지며, 전파는 일단계로 공정의 증추 장치까지 행해진다. 증추 장치까지 이탈이 전파되면, 일단계로 증추 장치부터 이탈에 대한 전파를 새로이 시작하여, 증추 장치의 하부 장치에 이탈을 전파하고 그에 대한 결과를 추론함으로써 증추 장치가 다른 장치와 공정에 미치는 영향을 유추할 수 있다.

보일러 플랜트의 공급수 라인의 증추 장치인 스팀 드럼에서 공급수량의 "Less Flow"라는 이탈이 발생한 경우를 예로 들어보면(Fig. 12), "Q_w-in=-"을 입력공정변수로하여 스팀 드럼의 전파식을 이용하여 전파를 행하면 "Q_s-out=-", 즉 출력스팀유량의 "Less Flow"로 이탈이 전파되고, "T_s-out=+", 즉 "High Temperature"로 이탈이 전파됨을 추론할 수 있다.



<Propagation Equation>

- Dev(Qs-out)=Dev(Qw-in)-Dev(Qw-out)
- Dev(L)=Dev(Qw-in)-Dev(Qs-out)
- Dev(Ts-out)=-Dev(Qw-in)

(Q:Flow, T:Temp, L:Level, w:Water, s:Steam)

Fig. 12 Propagation Equations of Steam Drum

이상의 내용을 포괄하는 시스템의 구축을 위하여 인공지능용 언어인 Common LISP을 사용하였으며, 스팀 드럼의 전파식 중 "Dev(Q_s-out)=Dev(Q_w-in)-Dev(Q_w-out)"을 프로그래밍하면 Fig. 13과 같이 표현할 수 있다.

이상에서 설명한 스팀 드럼에 "Less Flow"가 발생한 경우를 본 시스템을 사용하여 HAZOP 분석을 실행하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다(Fig. 14).

7. 결론

본 연구에서는 보일러 플랜트를 대상공정으로 하여 HAZOP 분석 자동화를 위한 전문가 시

스템 구축의 모델링을 제시하였다.

```
(Setf (Get 'n10 'Section) 'Steam-Drum)
(Setf (Get 'e1001 'Name) 'Steam-Drum)
(Setf (Get 'e1001 'Class) 'Pivotal-Unit)
(Defun e1001-Sim-1
  (Qw-in Qw-out &optional (Qs-out))
  (Cond ((and (= Qw-in e) (=Qw-out 0))
    (Setf Qs-out Qw-in))
    ((and (= Qw-in +1) (=Qw-out 0))
    (Setf Qs-out Qw-in))
    ((and (= Qw-in -1) (=Qw-out 0))
    (Setf Qs-out Qw-in))))
```

Fig. 13 An Example of LISP Program

```
>(Cause-Consequence-Result -)
(((Feed Water Less)
 (Steam Drum Level is Low)
 ((Steam Drum Lower Level)
 (Overheated Boiler Surface)
 (Ruptured Boiler) (Explosion))))
```

Fig. 14 HAZOP Analysis Result of System

대상공정에 대한 지식은 공정의 일반적인 지식과 공정 특유의 지식으로 분류하고, 장치를 객체적으로 관리함으로써 시스템에 유연성을 부여하였다.

이탈의 전파/역전파에 있어서 기능 의미네트 워크로 공정 장치를 기능 중심의 관점에서 인식함으로써, 각 공정간의 인과 관계에 의해 위험의 전파과정을 체계적으로 규명하여 사람이 수작업으로 행한 분석의 결과보다 자세한 분석이 가능하도록 하였다.

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정산업의 지능자동화 연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Center for Chemical Process Safety (CCPS), "Guidelines for Hazard Evaluation Procedures", AIChE, New York, 1985.

- 2) V. Venkatasubramanian, R. Vaidhyanathan, AIChE Journal, Vol. 40, No. 3, pp. 496~505, 1994.
 - 3) J.C. Parmer, F.P. Lees, Reliability Eng., Vol. 17, pp. 277~302, 1988.
 - 4) M.A. Kramer, B.L. Palowitch, AIChE Journal, Vol. 33, No. 7, pp. 1067~1078, 1987.
 - 5) A. Water, J.W. Ponton, Chem Eng Res Des., Vol. 67, pp. 407~422, 1989.
-