論文 11-3-14

화학공정의 위험상태 인식을 위한 지식 표현에 관한 연구

A Study on Knowledge Representation for Recognizing Hazardous States in Chemical Processes

안 대 명*·황 규 석*
Dae-Myoung An · Kyu-Suk Hwang
(1995년 11월 22일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

A system was developed that could predict hazardous states for safe operation of chemical plants. This system aimed to prevent hazards of chemical processes from misoperation before real operation. In this study, a data base was organized which consisted of all hazards in the chemical processes. The structure of process was represented by signed direct graph(SDG) of NODEs and ARCs. Each NODE and ARC have property variables; connected structure and state of processes etc. The hazards that could be occurred in processes were divided into two classes; one is by operation of unit and the other is by hazardous materials. Using Hazardous States Transition Network, we could recognize transition progress of process states.

1. 서 론

화학공업에서 취급되고 있는 물질에는 화재, 폭발 등의 잠재적인 위험을 가지고 있는 것이 매우 많다. 또한 화학공업은 기술 집약적인 장치 산업이라는 특성으로 그 구조가 대단히 복잡하여, 실제 공정의 운전상 범해서는 안되는 여러 제약 조건을 가지게 된다.

화학공정에서 존재하는 위험은 일반적으로 위험물질을 취급하므로서 발생할 수 있는 물리, 화학적인 위험과 공정을 구성하는 기기장치의 결함, 파손 등의 기계적인 위험이 존재하게 된다. 그러나 기계적인 위험은 재료의 구조 및 강도, 기기적 수명 등을 고려하여 유지, 보수 가능하며, 이의 철저한 관리를 통하여 어느 정도 예방 가능하지만, 화학적인 위험은 위험물의 종류가 대단히 많고, 위험성이 획일적이지 않고, 동일한 물질에 대해서도 상태 및 주위조건의 차이에 따라 위험성이 변하

* 부산대학교 화학공학과

기 때문에 물질의 위험성을 고려하여 상태변화에 따른 위험성이 발생하지 않도록 관리, 운전하는 것이 필요하다.

그러나 상태 변화가 심한 비정상상태의 운전시, 빠른 시간내 공정의 상태와 위험상황을 예측하기란 그리 쉬운 일이 아니다. 따라서 실제 운전자의 부담을 줄이고 화학공장의 안전 운전을 확보하기 위하여, 공정의 상태를 빠르고, 정확히 인식할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

Fig. 1은 이러한 화학공정의 상태를 인식하기 위한 시스템의 기본적인 처리흐름도이다. 시스템은 공정의 TOPOLOGY와 상태에 관한 DATA 및 위험특성 DATA BASE 그리고 상태모사기와 상태평가기로 구성되어져 있다.

본 연구에서는 실제공정에서 일어날 수 있는 조작자의 실수로 인한 오조작 때문에 발생할 수 있는 위험사고를 사전에 예측하기 위하여, 화학공정 내

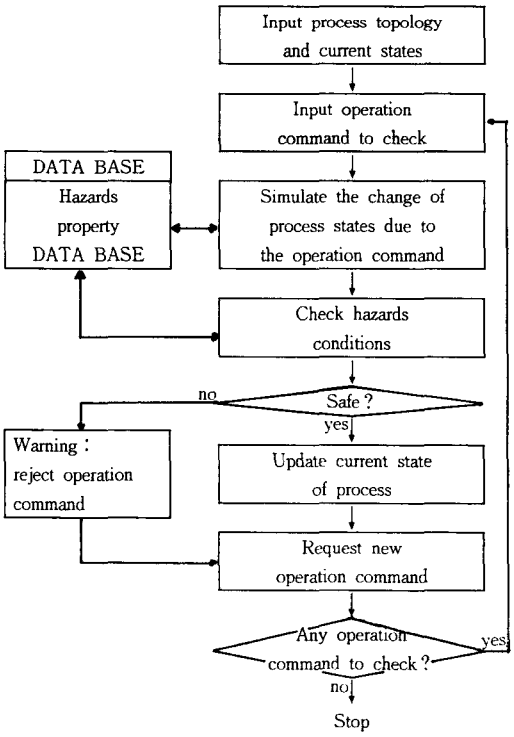


Fig. 1 The basic flow chart for predicting hazardous states

에서 발생가능한 위험상태를 모두 정리하여 지식 DATA BASE화하고, 각 기기장치의 조작시에 공정상태가 위험상태로 발전하는가를 인식할 수 있는 위험상태 인식시스템을 개발하고자 한다.

2. 화학공정의 위험성

화학공업 전반에 걸쳐 그 위험성을 설명하는 것은 대단히 어려운 문제이며, 본 연구에서는 화학공정에서의 위험을 크게 기기장치에 의한 위험 및 공정내 화학물질에 의한 위험으로 분류하여 살펴보기로 한다.

일반적으로 기기 장치에 의한 위험이란, 장치에 대한 작동전에 필요한 준비사항의 미비로 인하여 장치가 운전중 그 기능을 발휘하지 못하여 이상반응 등을 가져오는 위험과 장치가 가지는 허용 운전범위를 벗어나 장치의 변형, 파손 등의 발생으로 위험물의 누출, 화재 등의 위험을 발생시키는 물리적인 위험을 들 수 있다.

또 공정내 화학물질에 의한 위험은 공정내 화학물질의 발화, 폭발 등으로 인하여 발생되는 일반적인 위험뿐만 아니라 물질간의 상호작용에 의하여 발생되는 위험도 포함시켜 생각할 수 있다.

2.1 공정의 장치에 의한 위험

2.1.1 장치의 작동전 제약조건

펌프 등의 이송장치를 가동하기 위해서는, 회전축의 과열 방지를 위한 냉각수의 개통과 과압을 막기 위하여 공정 유체가 흐를 수 있도록 그 흐름 통로를 개통시켜야 하며, 또 공회전을 피하기 위하여 실제 유체가 있는지를 우선적으로 확인하여야 한다.

즉, 기기장치의 제기능을 수행할 수 있도록 일련의 절차를 통하여 장치를 작동시키기 전에 반드시 취해야 되는 사전 준비조건을 말한다.

2.1.2 장치의 운전중 제약조건

화학공정 장치는 각각 허용되는 운전범위를 가지며, 어느 특정의 운전조건이 이 범위를 벗어나는 경우 장치의 변형, 파괴 등으로 인한 화학물질의 누출, 폭발 등의 위험이 발생할 수 있다. 또 저온 증류탑의 운전시, 저온에 의한 탑내의 빙결때

문에 수분이 혼입되어서는 안전운전을 기대할 수 없다. 즉 공정을 안전하게 운전하기 위해서 필수적으로 요구되는 제약조건들을 말한다.

이상의 화학공정을 구성하는 기기장치의 운전에 따른 제약조건을 개략적으로 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1 Operational constraints of chemical process units

Unit	Constraints
Transport unit	Close of flow path Abnormal phase input Abnormal temp. or press input Oil check Cooling water check
Dryer & Reactor	Input of hazardous materials against catalyst and dryer Abnormal temp. input
Heat exchanger	Extreamly deviating input of temp. or press Coolant check

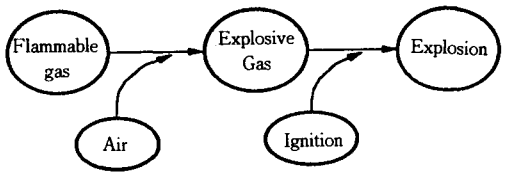
2.2 공정내의 물질에 의한 위험

공정내 물질에 의한 위험이란, 위험성 물질의 화학적 성질 및 외부 조건의 성립에 따라 발화, 폭발 등의 위험상태로 발전하거나, 물질 상호간의 작용으로 가연성, 폭발성, 유독성 물질을 생성하는 위험을 말한다.

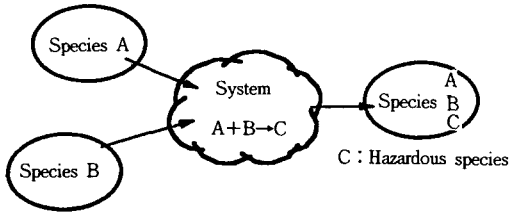
예를 들어, 가연성 가스 및 증기가 공기와 혼합하여 일정농도 이상이 되면, 폭발성 혼합가스를 생성하고, 여기에 착화하면 순간적인 가스폭발을 일으키게 된다. 즉, 공정의 위험상태는 위험성 물질의 존재하에 특정의 조건 또는 상태가 추가되어 발생하게 된다. (Fig. 2 (a))

또 다른 위험은 2종 또는 그 이상의 물질이 혼합하거나 또는 서로 접촉하여 폭발의 위험을 만드는 것으로, 이러한 혼합위험은 제조공정에서 예기치 않은 화재 및 폭발 사고의 원인이 된다. (Fig. 2 (b))

따라서 본 연구에서는 공정내 물질에 의한 위험을 크게 위험물질의 물리 화학적 특성에 의한 특정조건에서의 위험 및 공정내 물질간의 혼합, 접촉에 의한 위험으로 구분한다.



(a) Change of process states



(b) Mixing of many species

Fig. 2 Hazardous states due to dangerous materials in chemical process

2.3 위험상태 전이 NETWORK

일반적으로 공정상태가 위험상태로 발전하기 위해서는 위험성 물질이 가지는 물리화학적 성질인 가연범위 또는 폭발범위 등을 만족해야 한다. 이는 실제 공정의 운전시 피해야 되는 운전제약 조건이 된다.

본 연구에서는 공정 내에서 발생할 수 있는 위험상태를 크게 화재, 폭발, 누출에 의한 위험으로 구분하여, 각 위험상태에 도달하기 위한 인과관계를 AND/OR 논리를 사용한 위험상태 전이 NETWORK를 이용하여 표현한다. (Fig. 3)

위험상태 전이 NETWORK는 상태변화에 따르는 복합적인 상황의 인과관계를 가시적으로 예측하는데 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 가연성 가스가 가스폭발을 일으키기 위해서는 공기의 혼입, 일정농도 이상인 폭발성 혼합가스의 생성, 점화원 등의 일련의 조건을 만족하여야 한다. 따라서 각 상태전이에 대한 필요 충분조건을 규칙화된 방법을 사용하여 이를 표현하게 되면, 공정의 현재상태에서 위험상태의 발생 가능성여부를 쉽게 파악할 수 있으며, 임의의 상태에서 특정 조작이나, 상태가 추가되어 새로운 상태로 발전, 궁극적으로

위험상태로 전이되는 과정을 쉽게 설명할 수 있다.

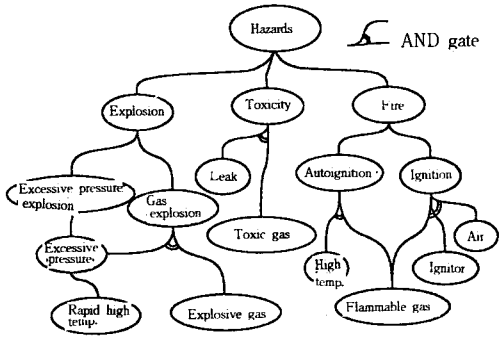


Fig. 3 A part of State Transition Network

3. 유향그래프에 의한 공정구조의 표현

3.1 화학공정의 구성요소

화학공정은 크게 반응 및 혼합공정, 분리공정, 이송공정 및 유틸리티 공정 등으로 구성되어 있으며, 각 공정은 펌프, 반응기와 같이 공정으로 유입된 물질의 상태를 변화시킬 수 있는 구성요소와 파이프와 같이 단순히 공정의 결합 구조를 나타내는 비요소로 구성되어져 있다.

구성요소는 그 기능에 따라 펌프, 밸브와 같이 직접 조작 가능한 작동요소와, 반응기, 분리기, 열교환기와 같이 작동 요소를 조작한 결과 그 출력 상태를 변화시키는 기능요소로 분류한다. (Fig. 4)

이 경우 pump, compressor 와 같이 자기자신이 직접 작동한 결과 기능을 수행하는 것과 반응기, 분리기와 같이 작동요소를 작동시킨 결과로 하여 그 기능을 수행하는 것으로 구분할 수 있다.

각 단위공정에 영향을 미치는 유틸리티의 작동에 대해서는 유틸리티의 ON/OFF만 고려하여 작동요소로 취급하여 표현한다.

3.2 유향 그래프에 의한 화학플랜트 구조의 표현

화학공정 구조를 쉽게 표현하기 위하여 밸브를 제외한 구성요소를 NODE로, 파이프를 ARC로 하여 표현한다. (Fig. 5)

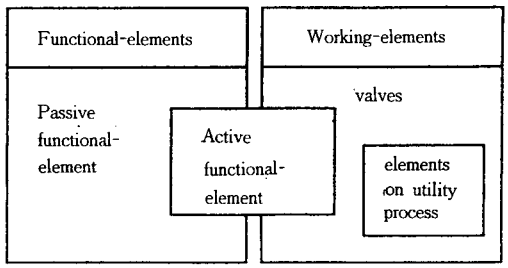


Fig. 4 The classification of chemical process elements

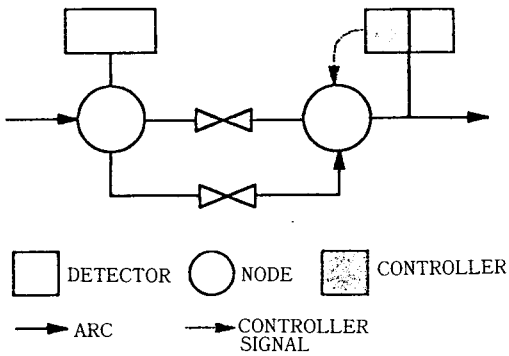
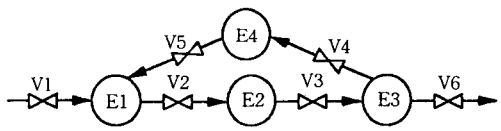


Fig. 5 Graphical representation of process structure

PATH : 실제 유체가 흐를 수 있는 경로를 말하며, 다음의 2가지가 있다. (Fig. 6)



FLOW-PATH : (V1 E1 V2 E2 V3 E3 V6)
CIRCUIT-PATH : (E3 V4 E4 V5 E1)

Fig. 6 An example of PATH

a) FLOW PATH : 입력 NODE에서 출력 NODE를 연결하는 ARC 열.

b) CIRCUIT PATH : LOOP 타입의 ARC 열.

4. 시스템 구성을 위한 데이터의 표현

Table 2 Data structure of a NODE

E0	NAME	HEAT-EXCHANGER	A unit name.
	APVAL	T/NIL	The active states of the node
	ARC	(S1)(S2)	A list of input-output arcs
	FUNCUTIL	WATER0	Functional utilities
	PHASE	MIX	The phase in the unit
	TEMP	L3	The temperature in the unit
	PRESS	L2	The pressure in the unit
	COMP	(C_4, C_3, C_2, H_2O)	The components in the unit
	PRE-OP-CONST	(OP-COND OIL0)	A list of preoperative works
	OP-CONSTRAINT	(TEMP OVER L5)	Operational constraints
	FUNCOP	(IF··· THEN···)	The list of functional rules

Table 3 Data structure of an ARC

S1	VALVE	V1	Valve name on the arc
	APVAL	T/NIL	ON/OFF state of the arc
	PHASE	MIX	The phase of the stream
	TEMP	L3	The temperature of the stream
	PRESS	L2	The pressure of the stream
	COMP	(C_4, C_3, C_2, H_2O)	All components in the stream

COMMON LISP을 사용하여 화학공정 상태 인식 시스템을 만들기 위해 사용되어진 데이타의 구조는 다음과 같다.

4.1 플랜트 표현을 위한 데이타 구조

4.1.1 NODE에 관계하는 데이터(Table 2)

1) NODE에 대응하는 장치명(NAME) : NODE의 이름은 En(n=0, 1, 2···)으로 서술하고, 실제 장치명을 표시한다.
2) NODE의 ON/OFF 상태(APVAL)
3) 입출력 ARC(ARC) : NODE로의 입출력 ARC 리스트로 플랜트내의 각 NODE의 결합구조가 표현된다.
   ((INPUT ARC LIST)(OUTPUT ARC LIST))
4) NODE의 상태 : NODE의 온도(TEMP), 압력(PRESS), 성분(COMP) 및 NODE내 상(PHASE)을 표시한다.
5) NODE를 기동시키기 위한 사전 준비조건(PRE-OP-CONST) : NODE의 기동 가능성을 체크하기 위한 사전 준비사항.
6) NODE의 운전 허용 범위(OP-CONSTRINT) : 운전 범위내에서 운전되는 지를 체크하기 위한 운전제약 조건.
7) 기능연산 룰(FUNCOP) : 각 NODE의 기능을 production rule의 형태로 나타낸다.

4.1.2 ARC에 관계하는 데이타 구조 (Table 3)

1) ARC 상의 밸브(VALVE)
2) ARC의 개폐 여부(APVAL)
3) ARC의 상태 : ARC의 유체상태를 PAHSE, TEMP, PRESS, COMP의 속성명에 표시한다.

4.2 기능연산룰

기능연산룰은 NODE의 기능을 표현하며, 공정의 입력상태 변화에 따른 공정의 상태변화를 예측할 수 있게 해 준다.

```
IF ((utility state) (input state))
THEN (output state)
AR (related arc list)
```

이것은 NODE의 입력상태가 IF부의 입력상태와 같고, 동시에 유틸리티의 상태도 IF부의 상태를 만족하게 되면, 그 NODE의 출력상태는 THEN부에서 표현한 상태로 된다는 것을 의미한다. 최후의 AR부는 입력측 ARC에서 출력측 ARC로의 상태가 전파되는 대응관계를 표시한다.

간단한 예로 DRYER의 기능연산룰을 표시하면 아래와 같다. DRYER의 기능은 건조제가 재생되어 있는 경우는 수분을 제거하지만, 그렇지 못한 경우는 입력측 성분이 그대로 통과한다. 여기서 입력측 온도 와 압력은 레벨수(L3, L2)로 표현하고, 입력측 ARC는 S1, 출력측 ARC는 S2이다.

```
① 건조제 재생시
   IF ((U DRYER) ((S1 (TEMP L3) (PRESS L2))))
   THEN ((S2 (DEL H2O))) AR ((S1 S2))
② 건조제 미재생시
   IF ((U NIL) ((S1 (TEMP L3) (PRESS L2))))
   THEN ((S2 (PT S1))) AR ((S1 S2))
```

건조제 재생시에는 수분이 제거되고(DEL H_2O), 미재생시에는 S1의 성분이 그대로 통과(PT; pass through)함을 보이고 있다. 이와 같이 표현된 기능연산룰은 공정내의 전 NODE에 대하여 Forward-Chaining 법으로 적용하면, 공정상태를 모사할 수 있다.

4.3 공정의 위험상태의 표현

공정의 상태 변화에 따른 위험 발전 가능성을 표현하기 위하여 공정내에서 발생할 수 있는 위험을 장치의 작동전 제약, 공정의 운전중 제약조건, 물질의 혼합 및 접촉에 의한 위험 및 일반적인 위험으로 분류하여 각기 표현한다.

4.3.1 공정 장치에 관한 위험

장치의 작동전 제약조건은 NODE의 속성명 "PRE-OP-CONST"에 운전전에 만족해야 하는 조건을 표현한다. 또 장치의 운전중 제약조건은 속성명 "OP-CONSTRAINTS"에 그 운전 허용범위를 지정하여 두고, 공정의 현재상태와 비교하여 위험성을 판별하게 된다.

NODENO : NODE의 NUMBER (E6 등)
unit-name : 장치의 실체명 (증류탑 등)
PRE-OP-CONST : 공정기기의 운전전에 만족해야 되는 조건
pre-op : 공정기기의 운전전 조건
OP-CONSTRAINT : 공정기기의 허용 운전 범위.

```
(NODENO (NAME unit-name)
        (PRE-OP-CONST((pre-op1)
                      (pre-op2))
        (OP-CONSTRAINT ((PHASE gas, liq or mix)
                        (PRESS level1)
                        (TEMP level2))))
```

```
ex) (E0 (NAME COMPRESSOR)
        (PRE-OP-CONST ((OIL-CHECK)
                       (OP-COND)
                       (COOLING-
                       WATER-READY))
        (OP-CONSTRAINT ((PHASE GAS)
                        (PRESS L1)
                        (TEMP L5)))))
```

여기서 작동전 제약조건 중 OP-COND (open-path-condition)이란 어떤요소를 작동시키는 경우, 그 요소가 작동하는 시점에서 open-path가 성립되어 있어야 한다는 제약조건을 나타낸다. 즉, open-path-condition은 유체를 흘려 보내기 위한 필요조건이 된다. 또 필요한 조건으로 실제 그 요소에 입력유체가 존재하여야 한다는 조건(이하 flow-condition)은 펌프와 같은 작동요소에 부속되는 조건이다.

4.3.2 공정내 물질간의 혼합, 접촉에 의한 위험

공정내 물질간의 상호작용으로 위험상태를 발생시킬 수 있는 물질들의 리스트 및 이에 따른 위험상태를 production rule에 의해 표현한다. production rule의 IF부에는 상호작용하여 위험상태를 유발시키는 물질의 리스트를 THEN부에는 이때 발생하는 위험상태를 표시한다.

```
MIXRULEno. (IF CONNECTED-WITH (comp1 comp2…)
           or MIXED-WITH (comp3 comp4…)
           THEN GENERATE mixcomp
```

MIXRULE : 공정에 관여하는 물질들의 혼합, 접촉에 의한 위험상태를 표현한 RULE.

CONNECTED-WITH : 물질간의 접촉 표현
MIXED-WITH : 물질간의 혼합 표현
GENERATE : 그 결과로서 생성되는 혼합물
ex) MIXRULE01 (IF CONNECTED-WITH (H_2O AIR)
THEN GENERATE EXPLOSIVE-GAS)
MIXRULE02 (IF CONNECTED-WITH (SO_2 AIR)
THEN GENERATE EROSIVE-GAS)
MIXRULE03 (IF EXIST EROSIVE-GAS
THEN GENERATE HAZARDOUS-COND)
MIXRULE04 (IF EXIST EXPLOSIVE-GAS
THEN GENERATE HAZARDOUS-COND)

4.3.3 공정의 일반적인 위험

공정내에서 발생할 수 있는 일반적인 위험상태를 크게 화재, 폭발 및 누출에 의한 위험으로 분류하여 표현하고, 각 위험상태에 도달되는 상태전파는 상태전이에 대하여 and-or gate를 사용한 NETWORK를 작성하여 이를 production rule로 표현하였다. (Fig. 7)

현재 공정의 상태가 위험상태에 도달되는 지의 여부는 공정내 상태를 상태전이 NETWORK를 따라 비교하여 판단할 수 있게 된다.

HAORULEno. (IF EXIST (compl comp2…)
AND TEMP or PRESS (levell level2)
THEN BECOME OCCUR or ARISE (situation1)
AND IS-A or A-KIND-OF (situation2)))

EXIST : 물질의 존재 여부
BECOME, OCCUR or ARISE : 상태 전이를 표현
IS-A or A-KIND-OF : 상황의 정의
situation : 여러 가지 반응조건이나 원인으로 인해 발생되는 상황

ex) HAORULE1 (IF EXIST C_2H_2
AND TEMP OVER L5
THEN BECOME DECOMPOSITION-OF-C_2H_2)
HAORULE2 (IF OCCUR DECOMPOSITION-OF-C_2H_2
THEN BECOME EXYHOTHERMIC-REACTION)
HAORULE3 (IF OCCUR CONDENSER-ABNORMAL
THEN BECOME FAILURE-OF-COOLING-EFFECT)
HAORULE4 (IF OCCUR FAILURE-OF-COOLING-EFFECT
AND OCCUR EXTHOTHERMIC-REACTION
THEN BECOME RUNAWAY-REACTION)

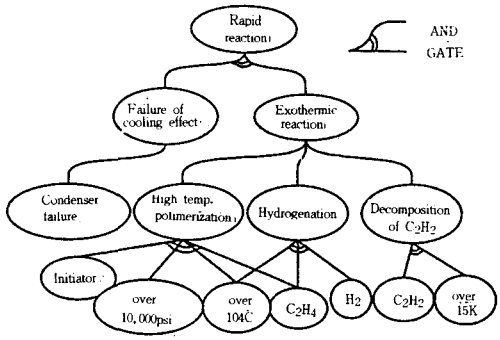


Fig. 7 A part of State Transition Network

5. 고찰 및 결론

위험화학물질을 대량으로 취급하고 있는 복잡한 화학공장에서, 조작자의 실수로 인한 오조작 운전 또는 비정상상태 운전시 발생가능한 위험상태를 사전에 방지하기 위하여 화학공정 위험상태 인식에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 화학공정내에 존재하는 위험성을 기계적인 위험과 물질의 특성에 따르는 위험으로 구분하였으며, 공정의 상태변화 및 위험상태 발생을 사전에 인식하기 위하여 공정내 존재하는 위험성을 장치의 작동전 제약조건, 운전중 제약조건, 물질의 혼합, 접촉에 의한 위험 및 그 외 일반적인 위험으로 구분, 정리하여 위험특성 Data Base를 작성하고, 이를 production rule의 형태로 표현하여 컴퓨터 상에서 추론가능하게 하였다.

화재, 폭발 등의 재해에 도달가능한 상태전이과정을 일반적인 형태의 NETWORK형태로 표현하고, 현재 대상으로 하고 있는 화학공정의 상태를 상태전이 NETWORK와 비교하여 재해를 유발할 가능성이 있는지를 판단할 수 있게 되었다.

본 연구는 한국과학재단 지정 우수연구센터인 공정산업의 지능 자동화 연구센터와 일주 학술문화재단의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1) S. Tomita, K. S. Hwang, E. O'Shima : J.

Chem. Eng. Japan, Vol. 22, No. 4, p. 364, 1989.
2) J.R. Rivas, D.F. Rudd, L.R. Kelly : AIChE J., Vol. 20, No. 2, p. 311, 1974.
3) E. O'Shima : Comp. Chem. Eng., Vol. 7, p. 311, 1983.
4) H.Y. Chae, Y.H. Yoon, E.S. Yoon : Korean J. Chem. Eng., Vol. 11, No. 3, p. 153, 1994.
5) P.H. Winston : "Artificial Intellingence", Addison-wesley Inc., 3rd ed., 1992.
6) S.H. Rich, V. Venkatasubramanian : Compt. Chem. Eng., Vol. 12, No. 1, p. 27, 1988.
7) K.S. Hwang, S. Tomita, E. O'Shima : Int. Chem. Eng., Vol. 31, p. 134, 1991.
8) J.R. Rivas, D.F. Rudd : AIChE J., Vol. 20, No. 2, p. 320, 1974.