

## 화학공정의 위험상태 예측 전문가 시스템

안대명 · 황규석<sup>†</sup>

부산대학교 화학공학과  
(1996년 2월 7일 접수, 1996년 8월 23일 채택)

## A Study on the Expert System for Predicting Hazardous Conditions of Chemical Process

Dae Myung An and Kyu Suk Hwang<sup>†</sup>

Dept. of Chem. Eng., Pusan National University, Pusan 609-735, Korea  
(Received 7 February 1996; accepted 23 August 1996)

### 요 약

화학공장의 start-up, shutdown과 같은 비정상조업의 운전지원 시스템으로, 공정내 발생가능한 위험성을 예측할 수 있는 전문가 시스템을 개발하였다. 본 연구에서 취급하는 위험성은 공정장치의 운전전 제약조건과 운전 중 제약조건, 공정내 물질의 혼합, 접촉에 의한 위험 및 일반적으로 발생가능한 위험으로 구분하여 정리하고, 이를 이용하여 위험특성 데이터 베이스를 작성하였으며, 공정의 결합구조와 상태의 표현규칙 및 공정내 위험성을 판별할 수 있는 추론기구를 개발하였다. 본 시스템을 구체적인 화학공정에 적용시킨 결과, 공정내 존재하는 다양한 위험형태를 인지할 수 있었다.

**Abstract**—An expert system was developed to predict hazardous conditions in chemical plants as an operation-aid system for the automation of unsteady state process operation such as start-up and shutdown. In this paper, hazards were classified into three main groups; constraints for preoperation and main operation of process units, hazards by mixing of dangerous materials, and potential hazards in process. By using these three groups, Hazardous-Condition-Data-Base was organized, after that, the methodology to represent process topology and process states was developed. An inference engine was developed for evaluating hazards in process and applied to the practical chemical plant to identify various types of hazards.

**Key words:** Expert System, Hazardous Condition, Operation-aiding System, Chemical Plant

### 1. 서 론

오늘날 화학공장은 이윤의 극대화를 위하여 고도의 제어 및 계장 기술을 도입하고 효율적인 관리와 안전운전에 그 관심을 집중하고 있다.

화학공장의 사고는 대부분 start-up, shutdown 등의 비정상 운전시 발생하며, 운전자의 오조작에 의한 사고가 주류를 이루고 있다. 이는 화학공업이 위험물을 대량으로 취급하며, 다양한 위험 발생 가능성, 까다로운 운전조건을 가지는 특성에서 기인되며 화학공장의 완전한 자동화를 이루지 못하게 하는 한 요인으로 작용한다.

공정운전의 안전성 확보에 관한 최초의 연구는 Rivas[1-2] 등에 의한 연구로 공정내의 밸브조작으로 위험물질이 혼합 폭발할 가능성을 미리 예측하였으나, 단순한 경우만을 상정하였고 다양한 위험 조건을 취급할 수 없었다. 최근에는 인공지능 기술을 화학공장의 운전지원 문제에 적용한 SDG Model, 계층구조 Model, 인공신경 회로망(neural network) 등을 이용한 연구결과들[3-10]이 발표되었으나, 운전관리의 안전성확보에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 start-up, shutdown 등 비정상상태 운전시 공정내 물질들의 잠재적 반응 위험특성과 물리적인 제약조건을 고려하여,

운전자의 오조작에 의한 위험사고를 사전에 방지할 수 있는 운전지원 시스템을 개발하고자 한다.

### 2. 위험상태 예측 시스템의 기본전략

화학공장의 start-up, shutdown, emergency 조작 등, 비정상상태 운전은 공정내의 운전 제약조건과 위험상태 발생가능성 조건을 침범하지 않고, 초기상태에서 목적상태로 도달하기 위한 일련의 실행 가능한 operation sequence를 발견하는 문제이다. 또 현재의 상태에서 조작 가능한 operation을 탐색하는 작업은, operation에 의해서 야기되는 공정상태의 변화를 정확히 예측하여, 선택된 operation에 의해서 공정내에서 발생 가능한 위험성을 사전에 예측할 수 있는 시스템을 기본적으로 필요로 한다(Fig. 1).

그러므로 비정상상태 운전의 자동화를 위한 기본 단계로, 임의의 조작에 따른 공정의 위험성을 사전에 예측하여 공정운전을 항상 안전한 상태로 유지시켜주며, 공정운전시 운전자의 오조작을 방지할 수 있는 운전지원 시스템을 개발하고자 한다.

이러한 시스템을 개발하기 위해 해결해야 할 과제는 다음과 같다.

제 1단계: 대상공정의 표현, 운전조작 및 공정상태의 표현

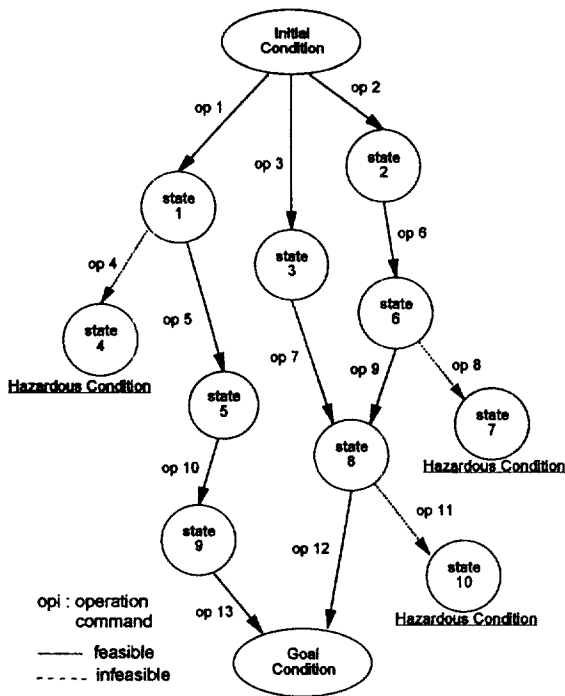


Fig. 1. Synthesis of operating procedure.

- 대상공정의 topology 및 상태 표현문제 해결
- 제 2단계: 공정운전 중의 제약조건, 발생 가능한 위험상태 등의 지식 표현
- 위험특성 data base의 구축
- 제 3단계: 공정상태 모사기의 개발
- 운전조작에 의한 공정상태 변화를 평가하는 모사방법의 개발
- 제 4단계: 공정의 위험상태 평가시스템 개발
- 현재공정 상태의 정확한 인식 및 위험상태 발생가능성 평가방법의 개발

### 3. 화학공정의 위험상태 예측 시스템

#### 3-1. 대상공정

본 연구에서는 석유화학 공업 중에서 주요한 원료 제조 프로세스인 에틸렌 플랜트 중 표준요소를 갖추고 있는 탈프로판탑 주변의 subsystem(Fig. 2)을 대상으로 하여 운전지원 시스템을 개발하였다.

가솔린 스트리퍼에서 나온 C4 이하의 가스상 성분은 compressor를 통하여 열교환기에서 냉각되고, decanter에서 기-액 분리되어 dryer를 거쳐 증류탑에 공급된다. 탑에서 나오는 C3이하의 성분은 2단의 열교환기를 거쳐 승온된 후, 다음단계로 보내어진다.

대상공정은 실제 플랜트를 model로 하고 있으나 modeling할 때, 실제의 plant보다 간략화하고 있는 부분은 다음과 같다.

- (1) 복수의 valve가 동일한 기능을 가지고 직렬 또는 병렬로 접속되어 있는 부분
- (2) 실제의 조작에서는 거의 사용되지 않는 valve 및 line
- (3) Dryer E3, E5 주변(3기가 병렬로 접속되어 있다. 각각, 가동, 대기, 재생의 상태로 있으며 전환작업은 수분계의 값을 check하여 적절히 행한다.)

#### 3-2. 시스템의 개요

Depropanizer in Ethylene Plant  
Low Temperature Distillation

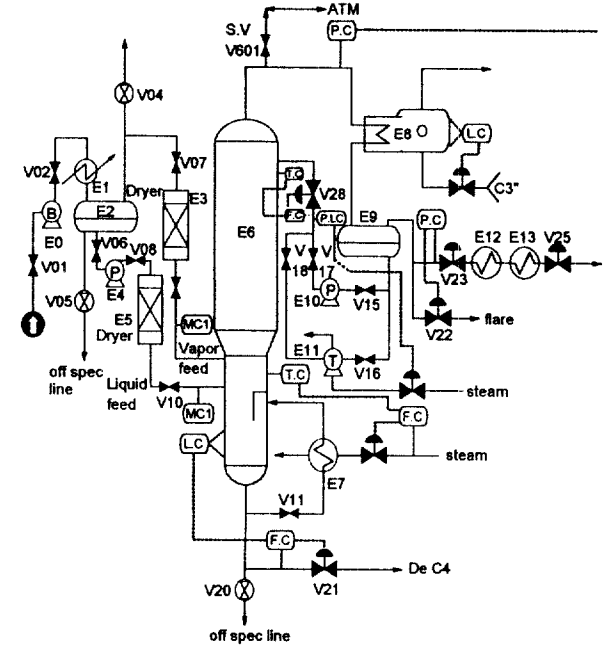


Fig. 2. Model process.

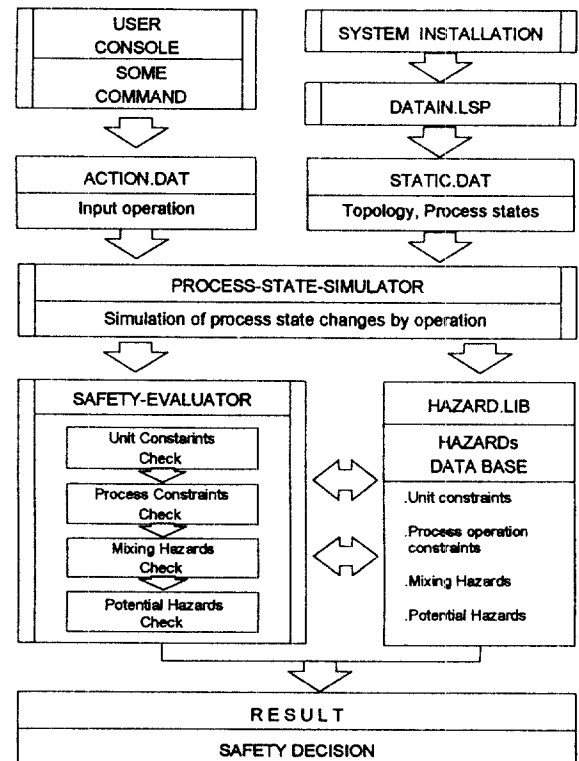


Fig. 3. Overview of HACOPS.

본 위험상태 예측 시스템(Hazardous Condition Predicting System, HACOPS)은 PC상의 COMMON LISP로 작성되었으며, 5개의 module로 구성되고, 각각의 기능은 다음과 같다(Fig. 3).

DATAIN.LSP: 대상공정의 결합구조 및 기기 장치에 관한 data,

Table 1. Data structure of ARC and NODE for state representation

S1	VALVE	V1	valve list on the arc
(ARC)	APVAL	T/NIL	ON/OFF state of the arc
	PHASE	MIX	phase state
	TEMP	L3	temperature level
	PRESS	L2	pressure level
	COMP	(C4,C3,C2,H2O)	materials in the arc
E0	NAME	HEAT-	unit name
(NODE)		EXCHANGER	
	APVAL	T/NIL	working state of the unit
	ARC	(S1) (S2)	in-output ARCs list
	FUNCUTIL	WATER0	functional utilities
	PHASE	MIX	phase state
	TEMP	L3	temperature level
	PRESS	L2	pressure level
	COMP	(C4,C3,C2,H2O)	materials in the unit
	PRE-OP-CONST	(OP-COND OIL0)	preoperating constraints before working
	OP-CONSTRAINT	(TEMP OVER L5)	operating constraints
	FUNCOP	IF-THEN RULE	functional operation rules of the unit

초기상태 등 대상 플랜트 고유의 data를 등록하는 module

HAZARD.LIB: 화학공정의 위험특성 DATA BASE

ACTION.DAT: start-up, shutdown시 운전원의 조작명령을 가상적으로 지시하는 module

PROCESS-STATE-SIMULATOR: 공정장치의 조작명령에 따른 대상공정의 상태변화를 모사하는 module

SAFETY-EVALUATOR: 조작에 따른 공정내의 위험상태 발생 가능성을 판단하는 module

본 시스템은 user로부터 기기 조작에 대한 명령을 지시받은 후, 먼저 조작부의 주위 기기의 조작전 후의 운전 제약조건을 검토한 후, 운전 가능하면 공정상태 모사기(process-state-simulator)에 의해 조작에 따른 공정상태를 simulation한다. 다음에 안전성 평가기(safety-evaluator)는 미리 준비된 화학공정 위험특성 data base(Hazard.lib)를 이용하여 공정내 물질의 혼합, 접촉 위험성, 공정운전상의 장치제약 조건 및 공정운전 조건의 변화에 따라 발생 가능한 위험성 여부를 체크한다.

## 4. 위험상태 예측의 방법론

### 4-1. 공정 구조 및 상태의 표현방법

대상 플랜트의 결합구조는, 밸브 이외의 고유기능을 가진 기기 장치를 node로 파이프로 arc로 표현하여 유량 그래프 상에 표시하고, node 및 arc의 상태는 Table 1에 나타낸 바와 같이, 각 arc내 유체상태, arc내 밸브의 개폐상태, node의 입출력 관계, 운전중 제약조건, 기동상태, 기능연산 rule 등으로 표현한다.

### 4-2. 조작에 따른 공정상태 변화 모사방법

조작에 따른 공정상태 변화의 모사는 기능연산 rule을 이용한 forward-reasoning method를 사용하였다.

기능연산 rule은, 다양한 조작 조건하에서 그 장치가 나타내는 기능을 확장된 IF-THEN RULE의 형태로 표현한 지식베이스로, 각 node의 "FUNCOP" 속성에 저장되어 있으며 다음 형식을 취하고 있다.

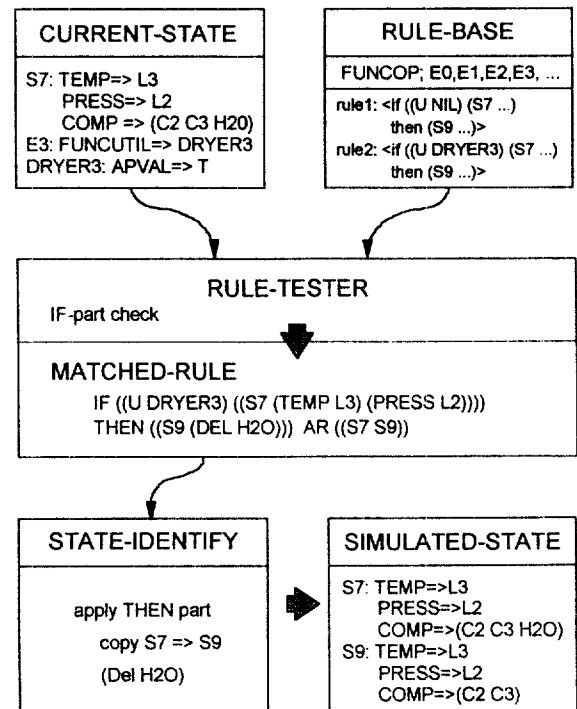


Fig. 4. Data flow by PROCESS-STATE-SIMULATOR.

(<IF(UTILITY 명)(입력 ARC상태 LIST)> <THEN(NODE상태 LIST)(출력 ARC상태 LIST)> <AR(입출력 ARC 대응 LIST)>)
(PUT 'E8 'FUNCOP '(IF((U REFRIGERANT8)(S(S13(PHASE GAS)(TEMP LESS L7)))) THEN((S14(TEMP L1)(PHASE MIX))) AR((S13 S14))))

이것은 IF부의 (UTILITY 명)에서 지정된 utility가 기동되고 또한, 그 장치에 유입되는 유체의 상태가 (입력 ARC 상태 LIST)와 일치할 때, 그 장치내의 유체의 상태 및 그 장치에서 유출되는 유체의 상태가 THEN부의 (NODE 및 출력 ARC 상태 LIST)에서 지정된 상태로 되는 것을 의미한다.

공정상태 변화의 모사방법은 다음과 같다(Fig. 4).

- (1) 공정의 topology와 위험특성 data base를 입력한다.
- (2) 공정의 현재상태(node와 utility, valve의 on/off 상태, 각 arc내 유체상태)를 인식한다.
- (3) User로부터 check할 조작을 입력받는다. 여기서 조작은 node, utility(냉각수, 열매, oil, 건조제 ...), valve 등의 on/off 조작으로 unit 중에서 증류탑, 열교환기 등과 같이 원래부터 open되어 있는 unit는 항상 on되어 있는 상태로 한다.
- (4) 이때, 조작의 내용이 (E0 ON)과 같이 unit일 때는 기기의 기동전에 만족해야될 제약조건인 PRE-OP-CONST를 check해야 한다(4-3참조). Pump 등의 수송장치의 경우, 기동 전에 oil을 check하고 냉각수를 보충해야 하며 OPEN-PATH조건(유체가 흐를 수 있는 통로 확보)을 만족해야 안전한 기동이 가능하다.
- (5) 조작에 의한 utility 및 node의 on/off 상태변화와 입력 arc 상태에 대응하는 기능연산 rule을 탐색하는데, 이때 rule의 IF부와 공정의 현재상태가 일치하는 rule을 선택한다.
- (6) 탐색된 rule을 AR부의 입출력 관계와 THEN부의 지정된 상태

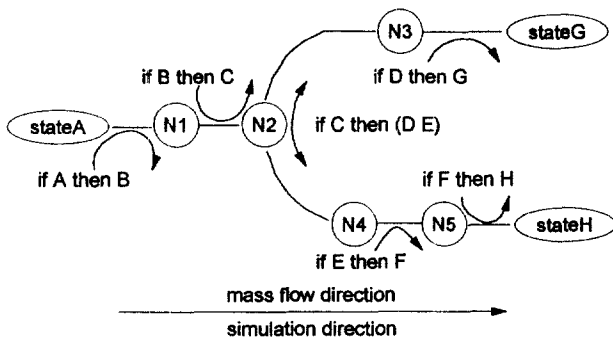


Fig. 5. Simulation procedure by Forward Reasoning Method.

기술에 의하여 forward-reasoning 적용시켜 대상공정에 존재하는 전 출력 arc 상태 및 node 상태를 변화시킨다.

기능연산 rule은 AR 및 DEL, PT 등의 특수기능을 포함하는 바, 이는 화학공정의 특수성에 기인하는 것으로, 예를 들면, 건조기와 같이 수분을 흡수, 제거할 때는 이러한 기능을 수식화하여 표현하기가 쉽지 않다. 기능연산 rule에서는 AR(입출력 대응관계), DEL(DELETE, 특정물질의 제거), PT(Pass Through, 입력조건이 출력조건으로 그대로 통과) 등의 표현으로 간단히 표현할 수 있다. 반응기, 열교환기, 증류탑 등의 장치는 모두 vessel type 또는 tube type의 장치로서 utility가 가동되지 않으면 입력이 그대로 출력된다. 즉, PT기능을 가진다.

위의 과정을 공정내 유체가 흐를 수 있는 전 path를 통하여 path상의 모든 node에 차례로 적용하면, 공정전체의 상태변화를 모사할 수 있게 된다(Fig. 5).

#### 4-3. 화학공정 위험특성 DATA BASE

본 연구에서는 공정 운전 중에 발생 가능한 위험상태를 정리하여 data base화하였다[11].

##### 4-3-1. 공정의 기기 장치에 의한 위험

운전자가 조작을 행하기 전에 각 장치가 안전하게 기동할 준비가 되어 있는지를 체크하기 위한 장치의 작동전 제약조건(oil-check, 냉각수 개통, 펌프 등의 흐름통로 개통 등)을 node의 속성명 "PRE-OP-CONST"에 정리하고, 공정운전의 허용범위를 나타내는 공정상의 장치의 운전 제약조건(허용온도, 압력, 지정상의 유체 입력 등)을 "OP-CONSTRAINT"에 정리하여 표현하였다.

##### EX) (E0 (NAME COMPRESSOR)

(PRE-OP-CONST(((OIL-CHECK)(OP-COND)  
(COOLING-WATER-READY)))  
(OP-CONSTRAINT((PHASE GAS)(PRESS L1)(TEMP L5))))

##### 4-3-2. 공정내 물질의 혼합·접촉에 의한 위험조건

공정에 사용되는 물질 중, 접촉에 의해 바로 폭발 등의 재해가 일어나거나 두 가지 이상의 물질들이 부적절한 비율로 혼합되어 그 반응의 결과, 위험물질이 생성되는 경우의 조건들을 표현하였다.

EX) MIXRULE01 (IF CONTACT-WITH (C2H2 AIR)  
THEN GENERATE EXPLOSIVE-GAS)  
MIXRULE02 (IF CONTACT-WITH (SO2 AIR)  
THEN GENERATE EROSIVE-GAS)

##### 4-3-3. 위험상태 발생가능성 조건

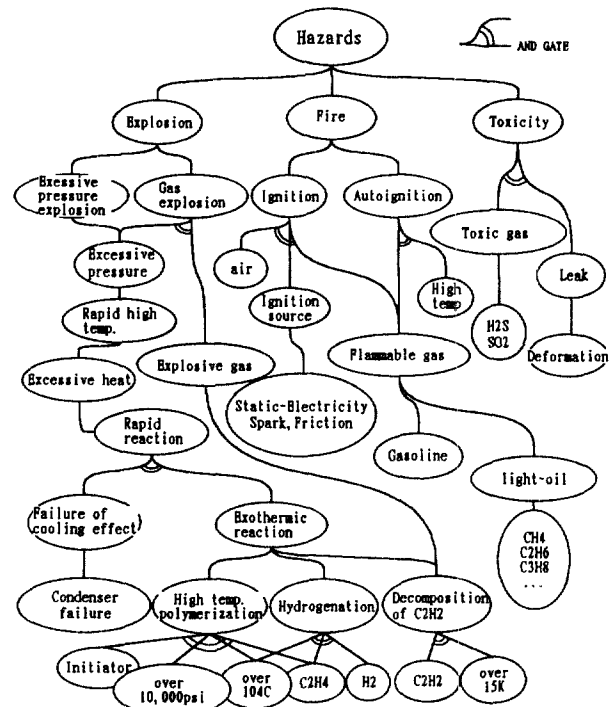


Fig. 6. A part of state transition network.

화학공정에서 나타날 수 있는 일반적인 위험상태를 화재, 폭발, 누출 등으로 구분하고, 위험상태가 어떠한 경로로 발생하는지를 위험상태 전이 network로 표현하였다(Fig. 6). 상태전이 network의 최하부 사상은 실제 공정에서 발생 가능한 여러 가지 조건들을 구체적인 대상공정의 상태변수 값들과 현재상황으로 표시하였다.

또한, 이 상태전이 network를 rule의 형태로 data base화하여 정리하였다.

EX) HAORULE1 (IF EXIST C2H2  
AND PRESS (OVER L3)  
THEN BECOME DECOMPOSITION-OF-C2H2)

#### 4-4. 공정 상태의 위험성 판별법

운전자의 조작에 의하여 대상공정의 상태가 공정모사기를 통하여 변화되었을 때, 위험특성 data base를 이용하여 공정내의 위험상태 발생가능성을 판별하는 방법은 다음과 같다.

##### 4-4-1. 장치의 작동전 제약조건에 의한 위험성

본 연구의 대상공정인 에틸렌 플랜트 depropanizer의 각 장치를 기동하기 전에 사전에 만족되어야할 제약조건 및 사전 준비조건은 아래와 같다.

- (1) Compressor, pump 등의 이송계 :  
- 물질 흐름을 위한 OPEN-PATH 확보, 냉각수 및 oil의 check
- (2) 건조기 : 건조제 재생상태 확인
- (3) 반응기 : 촉매 피독 물질의 제거, purge
- (4) 압력 vessel : 압력 조절용 valve open
- (5) Reboiler : 열매개통
- (6) 열교환기 : 냉매의 개통, 물질흐름을 위한 OPEN-PATH 확보

이러한 제약조건의 판별은 먼저, 해당하는 node의 속성치 "PRE-OP-CONST"에서 기동전 제약조건(예 : oil check 등)을 검출해 내고, 다음에 검출된 조건들의 현재상태(on/off)를 확인하여 제약조건의

만족여부를 결정한다.

#### 4-4-2. 공정상 장치의 운전 제약조건에 의한 위험상태

본 대상 공정내에서 피해야 할 일반적인 운전 제약조건들은 다음과 같다.

- Condenser에서 프로필렌 냉매를 작동하는 경우는 공정유체의 line-up이 되고서 행한다.; 저온 냉매로 인한 열교환기 파괴방지.
- 증류탑의 수분혼입을 금한다.; 저온으로 인한 탑내의 빙결, fouling 생성, 운전이상.
- Compressor의 start-up시에 그 출구 온도의 상승률이 적절한가.
- 고온, 고압하의 운전을 금한다.; 에틸렌의 열분해 발생.
- 유기황의 혼입을 금지한다.
- 이외에도 각 장치별로 지정압력, 온도, 지정상 이외의 입력, 전조제 열화물질 또는 촉매피독 물질의 혼입 등이 금지된다.

각 경우에 대하여 해당 node의 속성치 "OP-CONSTRAINT"에 제약조건을 정의하여 두고, 이를 공정의 현재 상태의 온도, 압력, 구성물질 등과 비교하여 공정의 상태가 운전 제약조건을 범하는지를 판별한다.

#### 4-4-3. 공정내 물질의 혼합, 접촉에 의한 위험성 판별법

공정내 존재하는 물질간의 혼합, 접촉에 의한 위험상태의 판별은, 위험특성 data base에 정의되어 있는 MIXRULE(혼합, 접촉에 의한 위험상태 발생 가능성을 정의한 IF-THEN rule)을 사용하여 수행하는데, 공정의 상태 중에서 성분("COMP")과 MIXRULE의 IF부 위험물질 리스트를 비교하여 폭발성, 유독성 물질이 발생할 수 있는지를 판별한다.

#### 4-4-4. 위험상태 발생가능성의 판별법

위험상태 발생가능성은 위험특성 data base의 HAORULE(위험상태전이 network의 IF-THEN rule)로 추론하여 위험발생 가능성을 판별한다(Fig. 7).

#### (1) 임의의 조작의 결과 모사된 공정의 상태(SIMULATED-STATE)

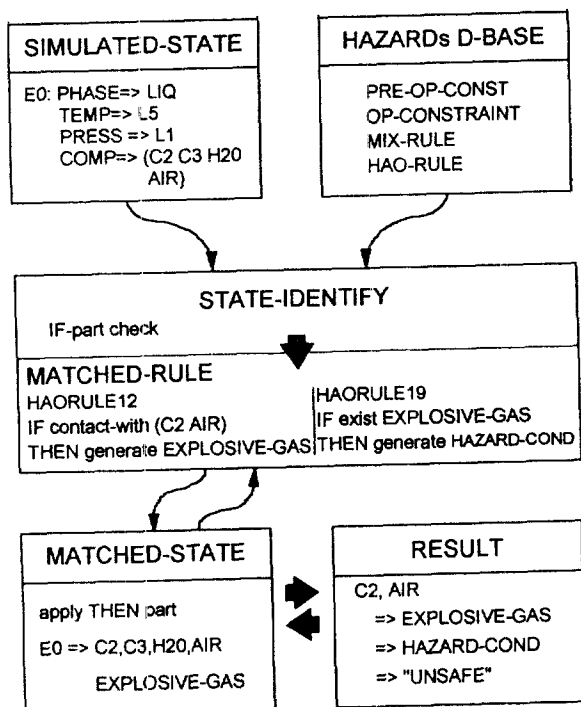


Fig. 7. Data flow by SAFETY-EVALUATOR.

와 위험특성 data base의 HAORULE을 working memory로 load 한다.

- (2) 변수 "MATCHED-STATE"에 공정의 상태(온도, 압력, 성분, 상)를 저장하여 둔다.
- (3) HAORULE에서 1개의 rule을 선택하여 rule의 IF부와 "SIMULATED-STATE"를 비교하여 일치하는 rule을 탐색하고, 일치된 rule의 THEN부의 결과를 "MATCHED-STATE"에 추가한다. Match된 rule의 결과(THEN부)를 "MATCHED-STATE"에 추가하므로써 공정상태가 어떠한 상태로 발전할 수 있는지를 쉽게 판별할 수 있게 된다.
- (4) Match된 rule은 따로 "MATCHED-RULE"에 저장하여 두고, working memory에서는 삭제한다. 이것은 rule의 적용시 중복을 피하고, 또한 실제 적용된 rule을 따로 보관하므로써 추론의 근거를 설명할 수 있다.
- (5) Working memory내의 rule을 "MATCHED-STATE"의 상태가 추가될 때마다 반복하여 적용하여 최종적인 결과를 얻는다.
- (6) 최종적으로 "MATCHED-STATE"에 "HAZARD-CONDITION"이 있는지를 검색하여 위험상태 발생 가능여부를 판별하게 된다.

## 5. 적용예

위험특성 data base의 구축 방법 및 상태모사방법, 위험상태 평가 방법을 이용하여 화학공장의 오조작 방지를 위한 시스템을 구축하고, 대상공정(Fig. 2)에 적용하여 위험상태 예측 성능을 평가하였다. 현재 개발된 시스템은 prototype의 시스템으로 화학공장의 표준적인 간단한 공정에 대하여 적용하였으며, 실제 공장 규모의 복잡한 공정에 적용하기 위해서는 추론 효율의 향상, data base의 입력방법의 개선 등 user interface의 강화가 필수적으로 이루어져야 한다.

대상공정은 system input, output 및 기기 장치를 포함하여 21개의 node와 25개의 arc로 표현되고(Table 2), 각 node의 운전전 제약 조건 및 운전범위는 실제 공정에서 운전되는 범위를 level로 환산하여 표현하였다(Table 3).

상태모사는 각 node가 가진 기능연산 rule 39개를 이용하여 수행되고, 위험상태 평가는, 공정내 취급되는 물질에 관한 혼합, 접촉위험 발생 rule 11개와 공정의 위험상태 전이에 관한 rule 31개를 이용하여 수행된다.

구축된 시스템을 가지고 가상의 시나리오를 발생시켜, 시스템이

Table 2. Node name and input, output arc

NODE	INPUT ARC	OUTPUT ARC
E0	S1	S2
E1	S2	S3
E2	S3	S4, S5, S6, S7
E3	S7	S9
E4	S6	S8
E5	S8	S10
E6	S9, S10, C12, C19	S13, S20, S21, C11
E7	C11	C12
E8	S13	S14
E9	S14	C15, C16, S22, S23
E10	C15	C17
E11	C16	C18
E12	S23	S24
E13	S24	S25
E28	C17, C18	C19

Table 3. Pressure and temperature level

Level	Press(kg/cm <sup>2</sup> )	Temp(°C)
0	-	-
1	10	- 30
2	12	- 17
3	15	0
4	19	22
5	39	34
6		40
7		85
8		100

공정운전시 조작에 대한 위험상태 발생 가능성을 평가할 수 있는지. 그 유효성을 검토하였다.

그 결과는 다음과 같다.

#### <실행예 1>

```

lisp2> *operation-list*                               ;; ①
((V1 OPEN) (WATER0 ON) (V2 OPEN) (V4 OPEN) (V5 OPEN)
(E0 ON))

lisp2> (hacops)                                       ;; ②
...
(OPERATION IS (E0 ON))                               ;; ③
(THE PRE-OP-CONSTRAINTS OF THE UNIT E0 ARE (OIL0
WATER0 OP-COND))
(CURRENT STATE IS (WATER0 ON) (OP-COND ON))          ;; ④
((E0 ON) THIS OPERATION CAN NOT SATISFY THE PRE-
OPERATION CONSTRAINTS.)
==> UNSAFE
NIL

lisp2> (setf *operation-list* '((oil0 on) (e0 on)))   ;; ⑤
((OIL0 ON) (E0 ON))

lisp2> (hacops)
...
(OPERATION IS (E0 ON))
(THE PRE-OP-CONSTRAINTS OF THE UNIT E0 ARE (OIL0
WATER0 OP-COND))
((E0 ON) THIS OPERATION CAN SATISFY THE PRE-OPERA-
TION CONSTRAINTS.)
(E0 SET THE APVAL VALUE T)
T                                                       ;; ⑥

```

lisp2>

(1) 우선 HACOPS를 기동시키기 전에 \*operation-list\*를 load한다. 예시에서의 \*operation-list\*는 compressor인 E0를 기동시키기 위하여 valve V1, V2, V4, V5를 차례로 열어 open-path 조건을 만족할 수 있도록 path를 설정하고, compressor E0에 냉각수를 돌려 기동준비를 한 후, E0를 실제 기동시키는 일련의 조작을 나타내고 있다.

(2) HACOPS를 실행하면, \*operation-list\*에 부여된 조작순서대로 조작을 행한 후, 각 조작이 실행될 때마다 공정의 상태를 변화시켜

Table 4. States of nodes and arcs after operations

	Phase	Temp	Press	Comp	Apval
S1	GAS	(L5)	(L1)	C3 C2 C4 H2O	T
S2	GAS	(L6)	(L2)	H2O C4 C2 C3	T
S3	GAS	(L6)	(L2)	C3 C2 C4 H2O	T
S4	GAS	(L6)	(L2)	H2O C4 C2 C3	T
S5	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL
E0	GAS	(L5)	(L1)	C3 C2 C4 H2O	T
E1	GAS	(L6)	(L2)	H2O C4 C2 C3	T
E2	GAS	(L6)	(L2)	C3 C2 C4 H2O	T
E3	NIL	NIL	NIL	NIL	NIL

나가게 된다.

(3) 마지막으로 (E0 ON)의 조작에 대하여 상태변화를 모사하게 되는데, (E0 ON) 조작에 의한 상태를 모사하기에 앞서 현재의 공정 상태에서 E0의 기동이 가능한지를 알아보기 위해 E0의 기동전 제약조건을 먼저 check하게 된다. E0의 기동전 제약조건은 E0의 property 중 "PRE-OP-CONST"에 나타나 있으며, 여기서는 냉각수의 개통, oil check 및 open-path 조건의 성립을 나타내고 있다.

(4) 본 예시에서는 현재의 상태가 E0에 대한 oil check가 되지 않아 E0를 기동할 수 없음을 알리고, 종료됨을 보여주고 있다.

(5) 여기서 \*operation-list\*에 (OIL0 ON)이라는 조작을 추가하고, 다시 (E0 ON)을 조작하고 HACOPS를 재실행한다.

(6) HACOPS는 E0에 대한 모든 기동전 제약조건이 만족되어 E0를 기동시킨다는 message와 함께 상태모사를 진행한다.

Table 4는 이제까지의 조작 후, node 및 arc의 상태를 나타내었다.

#### <실행예 2>

```

lisp2> (setf *operation-list* '((refrigerant1 on) (v601-open on) (v6
open) (v20 open) (v10 open) (oil4 on) (v8 open) (e4 on))) ;; ⑦
((REFRIGERANT1 ON) (V601-OPEN ON) (V6 OPEN) (V20 OPEN)
(V10 OPEN) (OIL4 ON) (V8 OPEN) (E4 ON))

lisp2> (hacops)
...
(OPERATION IS (E4 ON))

...
(THE PRE-OP-CONSTRAINTS OF THE UNIT E4 ARE (OIL4 OP-
COND))
((E4 ON) THIS OPERATION CAN SATISFY THE PRE-OPERA-
TION CONSTRAINTS.)                                     ;; ⑧
(E4 SET THE APVAL VALUE T)
(CHANGE THE STATES OF THE PROCESS)                     ;; ⑨
...
(WE FINISHED THE STATE-CHANGE BY THE OPERATION (E4
ON))

...
(THE STATE OF THE UNIT (E6) IS AS FOLLOWS)             ;; ⑩
(PRESS: (L2) TEMP: (L4) PHASE: (MIX) COMP: (C4 C3 C2 H
2O) ID: T)

(NOW WE WILL CHECK PROCESS-CONSTRAINTS.)              ;; ⑪
(THE OP-CONSTRAINTS OF (E0) IS ((PHASE LIQ) (TEMP L5)
(PRESS L1)))
==> SAFE

```

Table 5. States of nodes and arcs after operations

	Phase	Temp	Press	Comp	Apval
E0	GAS	(L5)	(L1)	C3 C2 C4 H2O	T
E1	GAS	(L6)	(L2)	H2O C4 C2 C3	T
E2	MIX	(L4)	(L2)	C3 C2 C4 H2O	T
E4	LIQ	(L4)	(L2)	H2O C2 C3 C4	NIL
E6	MIX	(L4)	(L2)	H2O C2 C3 C4	T
E8	GAS	(L4) (L8)	(L2) (L1)	H2O C2 C3 H2	T
E9	MIX	(L4) (L8)	(L2) (L1)	H2 C3 C2 H2O	T
S1	GAS	(L5)	(L1)	C3 C2 C4 H2O	T
S2	GAS	(L6)	(L2)	H2O C4 C2 C3	T
S3	MIX	(L4)	(L2)	C3 C2 C4 H2O	T
S4	GAS	(L4)	(L2)	H2O C2 C3	T
S5	LIQ	(L4)	(L2)	H2O C4	T
S6	LIQ	(L4)	(L2)	H2O C4	T
S8	LIQ	(L4)	(L2)	C4 H2O	T
S13	GAS	(L4) (L8)	(L2) (L1)	H2O C2 C3 H2	T
S14	GAS	(L4) (L8)	(L2) (L1)	H2 C3 C2 H2O	T

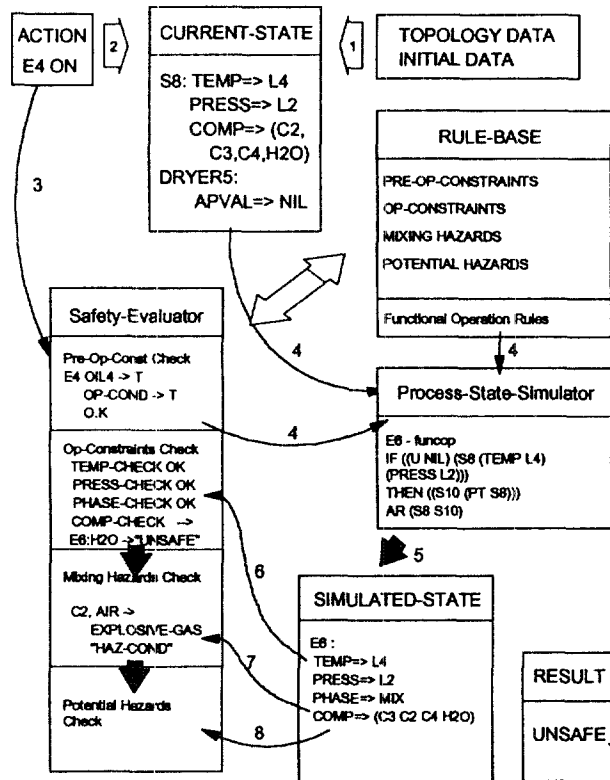


Fig. 8. Scheme of data flow by HACOPS.

(THE OP-CONSTRAINTS OF (E4) IS ((PHASE GAS) (TEMP (LESS L4)) (PRESS (LESS L2))))  
 ==> SAFE  
 (THE OP-CONSTRAINTS OF (E6) IS ((PRESS (L2 L3)) (COMP H 2O))))  
 :: ⑫  
 ==> \*\*\*\*\* OPERATION CONSTRAINTS !!! \*\*\*\*\*  
 ==> CURRENT STATES OF (E6) ARE (H2O C2 C3 C4).  
 ==> UNSAFE  
 NIL

lisp&gt;

(7) 계속해서 \*operation-list\*에 따라 일련의 조작을 실행하게 되고, 증류탑의 액상 입력펌프인 E4를 기동하는 (E4 ON)의 조작을 행하게 된다.

(8) 펌프 E4의 기동을 위한 선결조건은 open-path 조건의 만족과 oil check이고, 예시에서는 이를 만족하게 되어 장치의 기동여부를 가리키는 "APVAL"을 T로 바꾼다.

(9) 다음 E4의 기동에 따른 공정의 상태변화를 모사하게 된다.

(10) 공정상태의 모사 결과로 E6의 상태는 기액 혼상이고, 압력은 L2, 온도는 L4, 저장물질은 C4, C3, C2, H2O임을 알 수 있다.

(11) 다음, 모사 결과를 가지고 공정의 위험발생 가능성을 검토하는 단계를 거치게 되고, 그 결과 장치 E0, E4는 각각 운전 제약조건을 만족하게 됨을 알 수 있다.

(12) 마지막으로 증류탑 E6의 위험발생 가능성 여부의 체크도중, 저온 증류탑내에 수분이 들어와 탑내에서 병결되는 공정상 장치 운전 제약조건을 침범하게 되어, "UNSAFE"의 message를 되돌리며 종료하게 된다.

위의 예시는 운전자가 dryer의 작동여부를 확인하지 않았거나, 또는 dryer가 고장으로 dryer의 기능을 발휘하지 못한 상태에서 액상 feed pump인 E4를 기동시킬 경우, 저온 증류탑내로 수분이 혼입되어 병결되는 경우를 나타내며, 이때 시스템은 위험상태가 발생함을 알려주고 있다.

개발된 시스템은 조작의 추가, 변경 등에 따라 유연하게 공정의 상태를 변화시켜가며, 운전자의 공정상태 미확인 또는 오조작에 따른 공정의 위험발생 여부를 예측할 수 있음을 보여주고 있다. 즉, 본 시스템을 사용하여 계속되는 조작의 추가나 변경으로 공정의 상태 변화에 따른 공정의 위험발생 가능성 여부를 체크할 수 있음을 확인할 수 있었다.

Table 5는 최종적인 공정의 상태를 보여주며, Fig. 8에서는 시스템에서의 데이터 처리과정을 도식적으로 표현하였다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 화학공정의 비정상 조업시 운전원의 오조작을 방지하기 위한 운전지원 시스템을 개발하기 위하여 먼저, 공정을 node와 유향그래프로 표현하고, 위험상태 전이 network를 이용하여 공정의 위험상태를 표현하였다.

또 선택된 조작에 따른 공정의 상태를 기능연산물을 사용하여 모사하고, 모사결과 및 위험특성베이스를 사용하여 위험성을 평가하여 조작의 가능여부를 결정하는 일련의 시스템을 구축하여 대상공정인 에틸렌 플랜트에 적용하여 유효성을 검토하였다.

본 시스템을 사용하여 조작에 따른 공정의 상태를 빠르게 인식할 수 있으며, 이에 따른 오조작 방지 및 적절한 조작 결정을 지원할 수 있는 조업지원시스템의 개발이 가능해졌다고 생각된다.

## 감 사

본 연구는 한국과학재단 지정 우수 연구센터인 공정산업의 지능 자동화 연구센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. Rivas, J.R., Rudd, D.F. and Kelly L.R.: *AIChE J.*, 20(2), 311

- (1974).
2. Rivas, J. R. and Rudd, D. F.: *AIChE J.*, **20**(2), 320(1974).
3. Tomita, S., Hwang, K. S. and O'Shima, E.: *J. Chem. Eng. Japan*, **22**(4), 364(1989).
4. O'Shima, E.: *Computers Chem. Eng.*, **7**, 311(1983).
5. Chae, H. Y., Yoon, Y. H. and Yoon, E. S.: *Korean J. Chem. Eng.*, **11**(3), 153(1994).
6. Rich, S. H. and Venkatasubramanian, V.: *Computers Chem. Eng.*, **12**(1), 27(1988).
7. Hwang, K. S., Tomita, S. and O'Shima, E.: *Int. Chem. Eng.*, **31**, 134(1991).
8. Ramesh, T. S., Shum, S. K. and Davis, J. F.: *Computers Chem. Eng.*, **12**, 891(1988).
9. Allen, D. J.: *Ind. Eng. Chem. Fundam.*, **23**, 175(1984).
10. Chang, C. T. and Hwang, H. C.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **31**, 1490(1992).
11. An, D. M. and Hwang, K. S.: *J. KIIS*, **11**(1), to be published (1996).