

화학 플랜트의 고장원 탐색 전문가 시스템에 관한 연구  
— 기능구조에 의한 고장원 탐색 시스템 —  
**A Study on the Development of an Expert System  
for Chemical Plant Fault Diagnosis  
— A trouble analyzing system based  
on Functional Structure —**

황 규 석  
Kyu-Suk Hwang

**ABSTRACT**

A methodology to develop an expert system for chemical plant fault diagnosis based on functional-structure of chemical plant is proposed. A methodology to generalize and utilize the heuristic knowledge of plant operators is also developed.

A plant can be seen as a Hierarchical set of subsystems. Each subsystem is called a SCOPE. The state of the plant and the behavior of each subsystem is managed by the SCOPES.

An expert system based on this functional structure and knowledge base has been developed and applied to the subprocess of etylene plant to evaluate the effectiveness of the methodology.

**논문 개요**

화학 플랜트의 고장원 탐색을 지원할 수 있는 전문가 시스템을 개발하기 위한 방법론을 제시하고, 현장 OPERATOR의 경험적 지식을 일반화하여 활용하기 위한 방법론도 개발하였다.

종신회원 : 부산대학교 화학공학과

화학플랜트를, 계층적으로 결합된 하위기능을 가진 SUBSYSTEM의 집합이라 보고, 이러한 각 SUBSYSTEM을 SCOPE라 한다. SCOPE의 계층구조와 기능의 달성상태를 이용하여, 프로세스의 상태와 거동을 표현하였다.

진단 대상의 경험적 지식과 기능 구조에 의거한 전

문가 시스템을 개발하여 실제의 MOBEL PLANT에 적용하여 그 유효성을 검증하였다.

## 1. 서 론

최근의 화학 플랜트의 경우, 플랜트 가동 효율의 극대화와 운전경비의 절감을 위하여 플랜트는 일종 복잡한 제어 시스템을 구비하게 되었고, 그에 따라 플랜트 이상에 의한 SHUT-DOWN 시간이 증가하는 경향을 보이고 있다.

현재, 현장에서의 이상진단은 대부분이 숙련된 현장 운전원의 경험에 의존하고 있으며, 이러한 이상진단을 지원하는 시스템의 개발은 현장측의 강한 요망에도 불구하고 연구가 진전되지 않고 있는 것이 현실정이다. 따라서 본 연구에서는 화학 플랜트의 고장원 탐색을 지원하기 위한 운전지원 전문가 시스템을 개발하는 것을 그 목적으로 한다.

일반적으로, 이상상태를 나타내는 경보가 울렸을 때 운전원은 우선 프로세스내의 정보간에 성립하는 여러 종류의 인과관계에 착목하여 의심스러운 부분을 검색해낸다. 다음에 그 부분에서 어떻게 하여 그러한 현상이 발생하는지를 설명할 수 있는 시나리오를 과거의 사례나 경험적 지식을 구사하여 구성하고 그 결과로 고장원인을 추정한다. 컴퓨터를 이용한 전문가 시스템에서도 이러한 사고과정과 경험적 지식을 활용하면 유연하고 정확하게 고장원인을 탐색할 수 있는 운전지원 시스템의 개발이 가능하다고 본다.

이를 위하여, 전보에서<sup>1)</sup> 발표한 바와 같이, 화학 플랜트를 구성하고 있는 각 장치간의 계층관계 및 기능적인 인과관계를 기능구조에 의한 지식 Base의 형태로 정리하여, 숙련된 운전원에 의한 상황 판단법과 유사한 방법으로 대상을 지식표현하는 방법론을 개발하였다. 본 연구에서는, 이러한 상황인식 방법론을 활용하여, 실제로 현장에서 활용할 수 있는 고장원 탐색 지원 시스템을 소형 컴퓨터를 사용하여 개발하였다.

## 2. 기본적인 고장원 탐색 전략

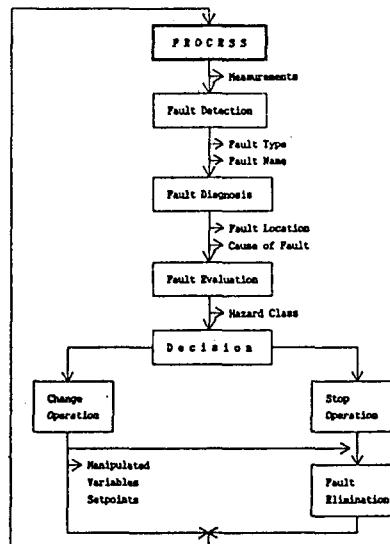


Fig.1 Supervision loop on appearance of a fault

일반적으로 화학플랜트의 운전중에 이상상태가 발생하면 OPERATOR는 FIG.1에 표시한 FAULT DETECTION, FAULT DIAGNOSIS, CHANGE OPERATION의 작업과정을 통하여 공정작업을 정상화시키기 위하여 노력한다. 화학공장에서 숙련 OPERATOR들은 PROCESS의 이상상태를 알리는 경보음(ASARM)이 울렸을때 일반적으로 다음과 같은 순서로 고장원 탐색을 행한다고 사료된다.

- 1) 지금까지 경험한 고장이면 고장부위를 바로 찾아낼 수 있다.
- 2) 만약 지금까지 경험하지 않은 고장인 경우에는, 우선 그 경보정치가 부착되어 있는 화학장치에 직접적인 이상원인(고장)이 발생했는지를 살핀다.
- 3) 직접적인 이상원인이 발견되지 않으면, 경보음이 발생한 경보장치가 부착되어 있는 화학장치를 중심으로, 그 장치에 어떤 이상이 전파될수 있는 기능적인 인과관계(즉, 기능적인 구조관계)를 가진 임의의 SECTION을 가정하여, 기능적인 인과관계로 인한 이상전파 여부를 검토해 본다. 예를들어, 냉각계에 이상이 발생하였을 경우, 기능적인 집합으로 냉각계를 구성하는 구성요소(또는 임의의 SECTION)에 그 이상 발생의 원인이 있다고 일단 의심한다. 여기서

여러 가지 사실을 종합하여 원인후보를 생성하고, 또 한 새로운 사실을 점차 확인하여 그 후보의 수를 축소시켜 나간다.

4) 만약에 그 SECTION에서 이상원인이 발견되지 않으면, 기능적인 인과관계를 가진 다른 SECTION으로 주시의 초점을 옮겨 이상원인을 탐색한다.

이상과 같이 현장의 OPERATOR가 플랜트를 운전 할때는, 각각의 기능계 또는 각각의 기능을 발휘하는 SECTION을 기능적인 인과관계로 서로 계층적으로 연관지어 파악하고 있다고 보아진다. 즉, 현재 대상

으로 하고 있는 플랜트에 존재하는 제 기능을 계층적으로 인식하고 분류하고, 만약에 프로세스에 이상상태가 발생하였을시는 대상프로세스내에서 기능적인 관련성으로 성립해야 될 여러 가지 하위 기능에 관한 정보를 체크함으로서 의심이 가는 부분 공정을 검출해 낸다. 이때 각 레벨의 기능을 달성하기 위하여 필요한 플랜트내의 특정의 SUBSYSTEM(기기및 장치의 정적인 결합구조)에 주목하여, 그 SUBSYSTEM의 기능이 발휘되고 있는지(즉, 고장발생 유무)를 검토함으로써 고장원탐색을 행하고 있다고 본다.

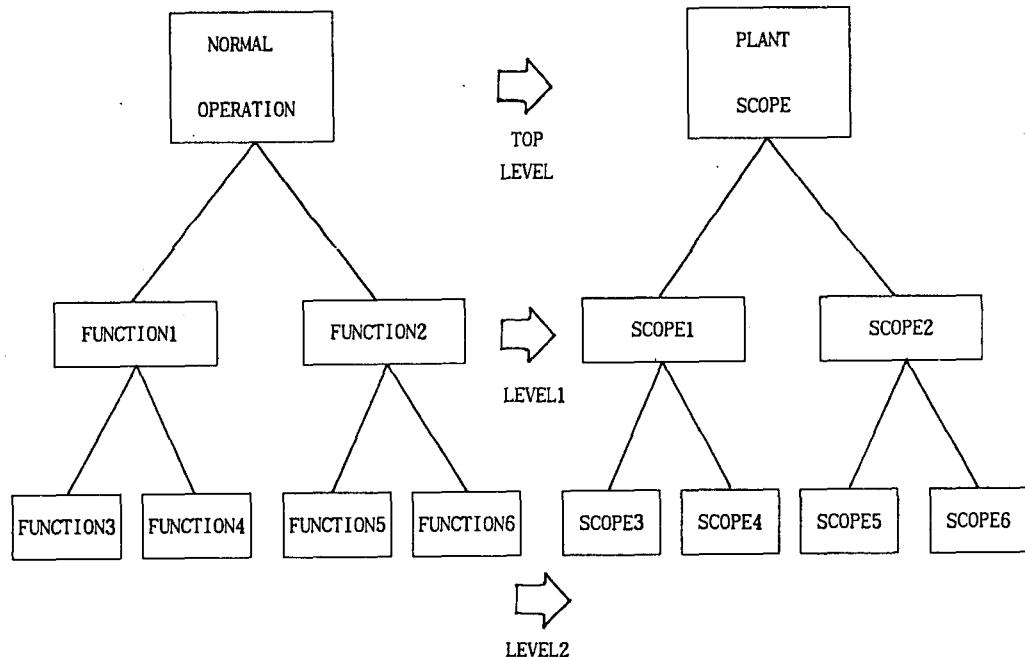


Fig.2 Relation between functions and scopes

본 연구에서도, 이와같은 화학플랜트의 기능적인 계층 구조에 기본을 둔 고장원 탐색 수법을 전개한다. 즉, 화학플랜트에 내재하고 있는 제 기능을 계층화하고, 각각의 기능을 달성하는데 필요한 프로세스의 SUBSYSTEM으로 『SCOPE』를 정의한다(FIG. 2). 각 기능의 달성 상태및 프로세스의 동적 거동은 SCOPE의 상태변수를 통하여 표현된다.

다음에, 고장원의 탐색은 임의의 기능이 발휘되지 않고 있는 것은 (즉, 이상상태의 발생)그 기능을 구

성하는 하위의 기능, 또는 기능적인 인과관계로 서로 연결된 기능에 이상이 있기 때문이라고 보고, 각각의 기능을 달성 하기 위하여 필요한 특정의 SCOPE의 집합을 먼저 검출해 낸다.

다음에, 검출된 SCOPE 내에서 발생가능한 고장원 인을 가정하여, 각 SCOPE의 상태변수 값에 대한 정상적 SIMULATION을 행하여 현재의 이상현상을 설명할수 있는 고장원인이 나타날때까지 탐색을 계속 한다.

### 3. 고장원 탐색 시스템

#### 3.1 시스템의 개요

고장원 탐색은 본 시스템의 의하여 작성된 대상 플랜트의 SCOPE의 INSTANCE에 대하여 먼저, 발생 가능한 고장원의 가설을 설정하고 그 고장원의 발생에 따라 발생되는 플랜트의 상태변화를 기능연산 RULE을 이용한 정성적 SIMULATION을 통하여 평가하고, 현재 플랜트의 이상현상을 설명할 수 있는지 여부를 검증하는, 가설-검증형식을 통하여 행하여 진다.

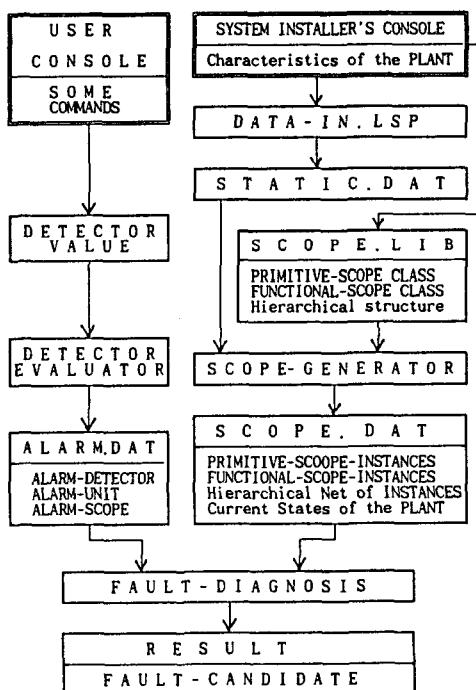


Fig.3 overview of the system

시스템은 5개의 MODULE로 구성되어 있으며 (Fig.3)PC-AT 상의 COMMON-LISP로 작성되었다.

- DATA-IN.LSP : 대상 플랜트 고유의 DATA를 등록하는 MODULE.

- SCOPE.LIB : SCOPE--LIBRARY, 화학 플랜트의 일반적인 SCOPE를 CLASS 형태로 정리한 지식 BASE

- SCOPE-GENERATOR : SCOPE-SIBRARY 를 참고로 하여 대상 플랜트에 존재하는 전 SCOPE의 INSTANCE와 계층구조를 작성하는 MODULE.

- DETECTOR-EVALUATOR : ALARM이 올린 DETECTOR와 직접 접속된 UNIT 및 기능 SCOPE를 검출하는 MODULE.

- FAULT-DIAGNOSIS : 기능연산 RULE의 FORWARD CHAINING을 이용한 정성적 SIMULATION을 통하여 고장원인을 검출하는 MODULE.

#### 3.2 대상 프로세스의 기능 구조 작성법

SCOPE는, 화학 플랜트를 구성하는 가장 기본적인 요소인 NODE, ARC, DETECTOR, CONTROLLER를 나타내는 PRIMITIVE-SCOPE와, UNIT와 LINE의 집합으로 구성되는 기능계인 FUNCTIONS-SCOPE(기능SCOPE)로 구별된다. SCOPE는 OBJECT-ORIENTED 방법론에 의한 CLASS-INSTANCE의 관계로 표현되고, 기본적인 기기 장치의 상태 및 거동의 표현은 FRAME 형태로 표현된 PRIMITIVE-SCOPE의 INSTANCE에 각 NODE, ARC등의 속성치 (PROPERTY LIST VALUE)를 부여함으로써 표현된다.

기능SCOPE의 INSTANCE를 작성하기 위하여, 기능SCOPE의 기본단위가 되는 BLOCK, RECYCLE의 개념을 도입한다.

- ① 대상 플랜트의 GRAPH 표현에 의거하여, BLOCK (유한/무한, 물질SINK/SOURCE로 구별되는 물질이 흐를 수 있는 최소 SUBPROCESS를 의미 함) 및 RECYCLE(화학 플랜트의 특징인 LOOP 형태의 LINE을 작성하기 위한 BLOCK의 집합)을 작성한다.

- ② 기능SCOPE의 INSTANCE를, SCOPE-SIBRARY에 기술되어 있는 SCOPE간의 계층 관계

를 참조하여 작성한다. 이러한 기능SCOPE의 계층 구조를 작성하는 과정은, FEED-KIN-LINE, RE-

FLUX-LINE과 같은 최하위의 기능SCOPE인 기본 기능단위에 도달할 때 까지 반복된다.

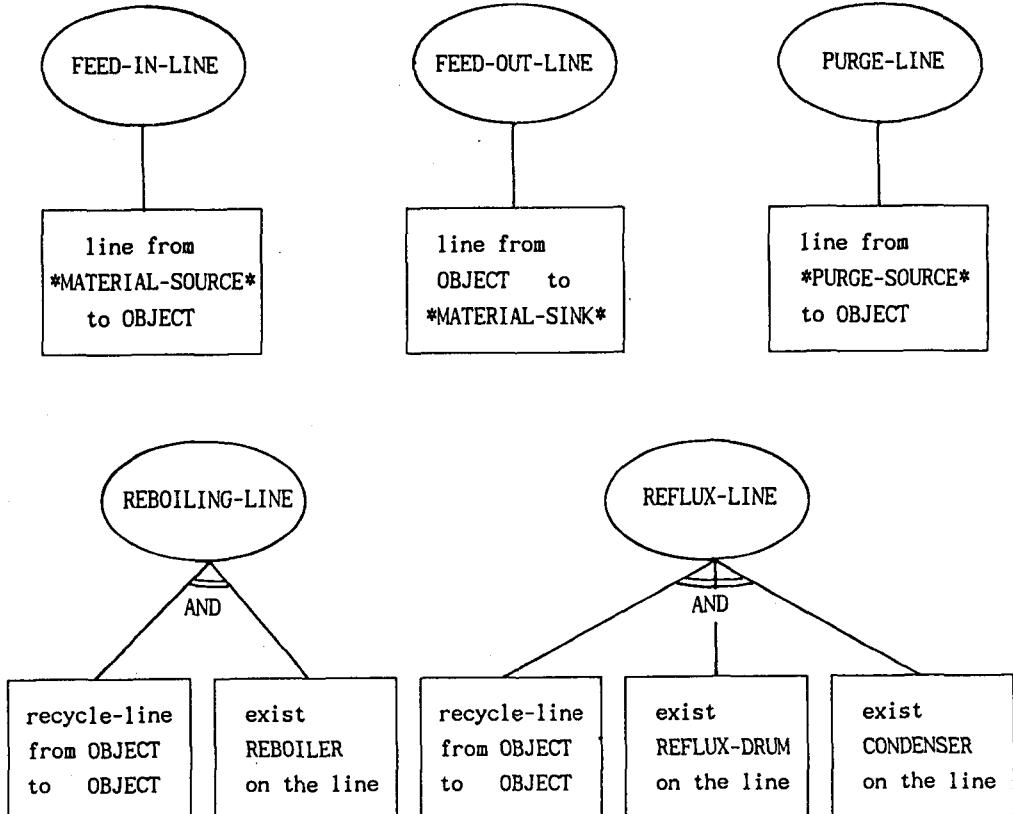


Fig.4 A part of knowledge-base

③ 이러한 기본 기능단위에 대하여 부과된 조건 (즉, 기본 기능단위가 어떠한 구조적 조건을 만족해야 하는가에 관한지식, FIG.(4)을 이용하여, 그러한 구조조건을 만족하는 INSTANCE를, BLOCK과 RECY-CLE의 집합으로써 작성하고, 상위의 기능 SCOPE의 INSTANCE에 하위구조로 등록한다.

FIG.5에 중류기능 SCOPE를 구성하는 각 레벨의 기능SCOPE의 INSTANCE를 작성하는 과정을 나타내었다.

### 3.3 FAULT-DIAGNOSIS 에 의한 고장원 탐색ALGORITHM

기능연산 RULE을 이용한 정성적 SIMULATION으로 이상원인을 탐색하는 과정은 다음과 같다.

- 1) 우선 대상 프로세스로부터 주어진 DETECTIOR 값을 사용하여 ALARM이 울린 DETECTOR (즉, 정상 운전치를 벗어난 DETECTOR,\*ASARM-DETECTOR\*)를 검출해 낸다.
- 2) 각 \*ALARM-DETECTOR\*가 부착되어있는 기기장치를, 프로세스의 결합구조에 관한 DATA를 사용하여 검출하고(\*ALARM-UNIT\*), ALARM이 울린 DETECTOR와 기능적으로 연관되어 있는 기능 SCOPE를 기능적인 계층관계를 이용하여 검출해낸다(\*ALARM-SCOPE\*).
- 3) \*ASARM-UNIT\*와 \*ALARM-SCOPE\* 내

의 각 기기 장치에 대하여 아래와 같은 정성적 SIMULATION을 실행하여 고장원인을 탐색한다.

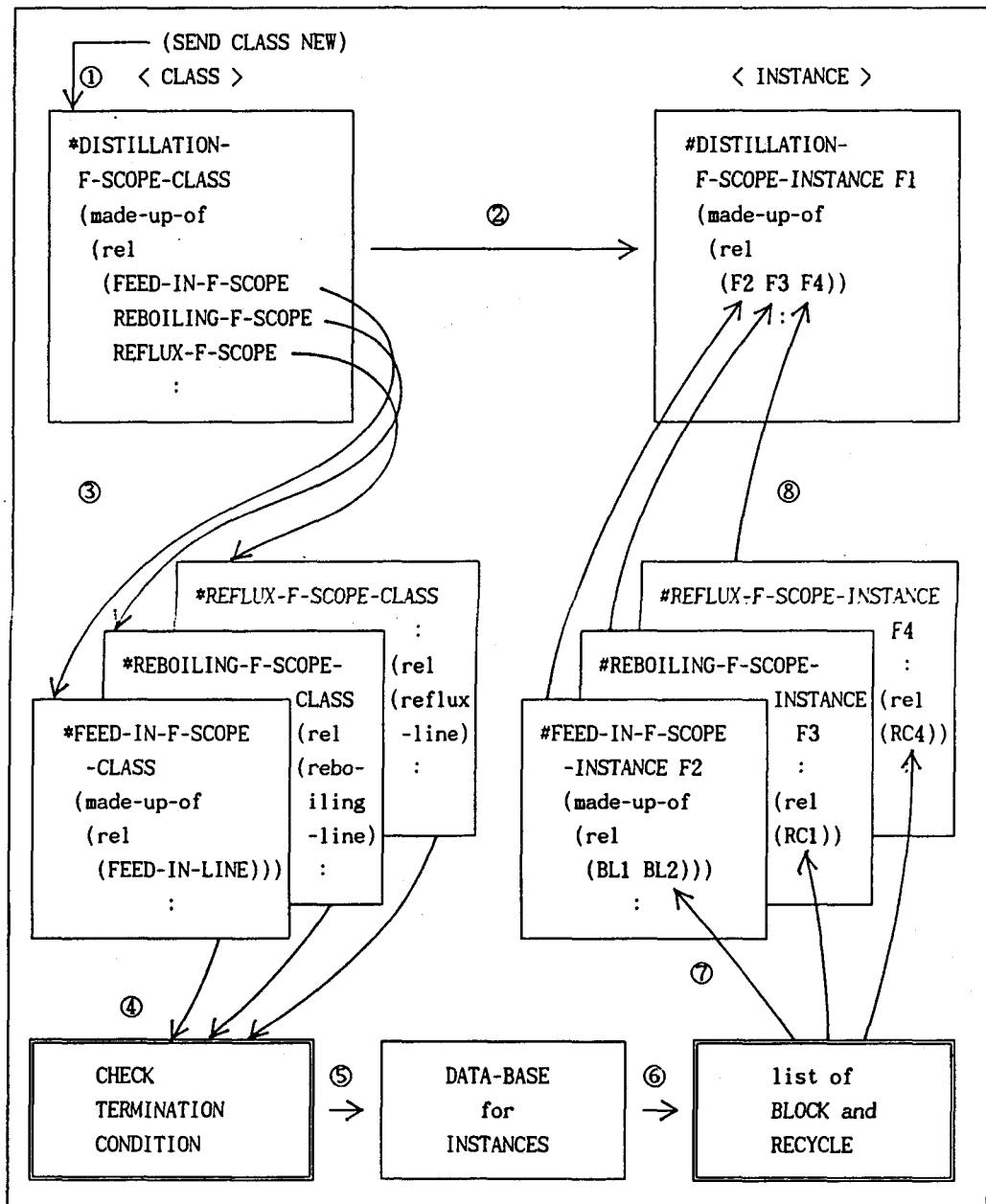


Fig.5 Generation of instance of distillation functional-scope

한 한개의 TROUBLE-NAME (\*TROUBLE\*) 을 선택한다.

②\*TROUBLE\*이 이상원인이라고 가정하고, 대상 프로세스내의 각 장치의 속성치 NORMAL과 ABNORMAL에 저장된 기능 연산 RULE을 이용하여, 대상 프로세스의 시스템 입력으로 부터 출발하여 FORWARD CHAINING에 의하여 각 장치의 상태와 연결된 ARC 및 DETECTOR의 상태값을 추론한다. (FIG.6)

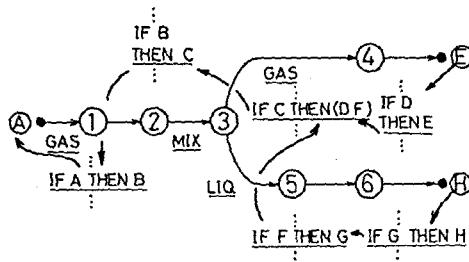


Fig.6 Forward chaining by functional rules

③ 추론은, 현재 SIMULATION을 행하고 있는 주목 NODE의 기능연산 RULE 중에서, RULE의 IF PART에 기술되어 있는 상태가 주목 NODE로의 입력 ARC상태와 일치하는 RULE을 찾아내어 (MATCHING), RULE의 THEN PART와 AR PART에 지정된 상태에 의거하여, 주목NODE로 부터의 출력 ARC 및 접속된 DETECTOR의 상태를 결정하는 과정(IDENTIFY)으로 이루어지며, 화학 프로세스의 특징인 RECYCLE LOOP에서의 수렴판정과 MATCHING이 실패했을 경우의 BACKTRACKING을 행하면서 진행된다.

④ 추론된 프로세스의 상태가 현재 주어진 프로세스의 DETECTOR값과 일치하는지 CHECK하여, 만약에 일치하면 현재 가정된 \*UNIT\*의 \*TROUBLE\* 을 가정하여 정성적 SIMULATION을 계속한다.

4) 이상과 같은 탐색과정을 대상 프로세스 내의 전 UNIT에 대하여 실행하는 것은 불합리하므로, 가장 가능성이 높은 UNIT 순으로 (즉, ALARM이 울린 DETECTOR와 기능적으로 직접 연관되어 있는

UNIT를 기능 SCOPE의 계층구조를 이용하여 검출해냄), USER가 선택한 MODE로 탐색영역을 제한거나 넓히면서 자유롭게 탐색할수 있다.

## 4. 이상진단 실행예

### 4.1 대상 플랜트의 개요

시스템의 유효성을 검증하기 위하여, ETHYLENE PLANT의 DEPROPANIZER 주변의 SUB-PROCESS에 적용시켜 그 결과를 평가하였다.(FIG. 7)

C4이하의 가스 상태의 성분은 COMPRESSOR를 통하여 열교환기에서 냉각되고, DECANTER에서 기-액 분리되어, DRYER를 거쳐 증류탑에 공급된다. 탑정에서 나오는 C3이하의 성분은 2단의 열교환기를 거쳐 승온된 후, 다음 단계로 보내어진다.

본 프로세스는, NODE 26개, ARC29개, DETECTOR41개, CONTROLLER 9개로 구성되고, GRAPH표현은 FIG.8과 같다.

#### [이상현상]

DEPROPANIZER 탑저 E33의 액위 CONTROLLER C2의 출력치가 증가하고, CASCADE CONTROL로 연결되어있는 유량CONTROLLER C18의 출력도 상승함. 탑저 액위계 D14가 저하하고 탑저 유량계 D15가 상승함.

#### [진단 결과]

시스템은 대상 프로세스에서 105개의 PRIMITIVE-SCOPE와 15개의 BLOCK, 7개의 RECYCLE, 73개의 기능SCOPE를 작성하고(FIG.9), 이상차가 검출된 UNIT 및 계층구조로 연결된 기능SCOPE에 대한 이상원인을 탐색한 결과(FIG.10), 액위CONTROLLER C2 또는 유량CONTROLLER C18의 이상으로 판정 하였으며, 추론과정에 대한 설명기능도 보유하고 있다.

## 5. 결론

## Low temperature distillation

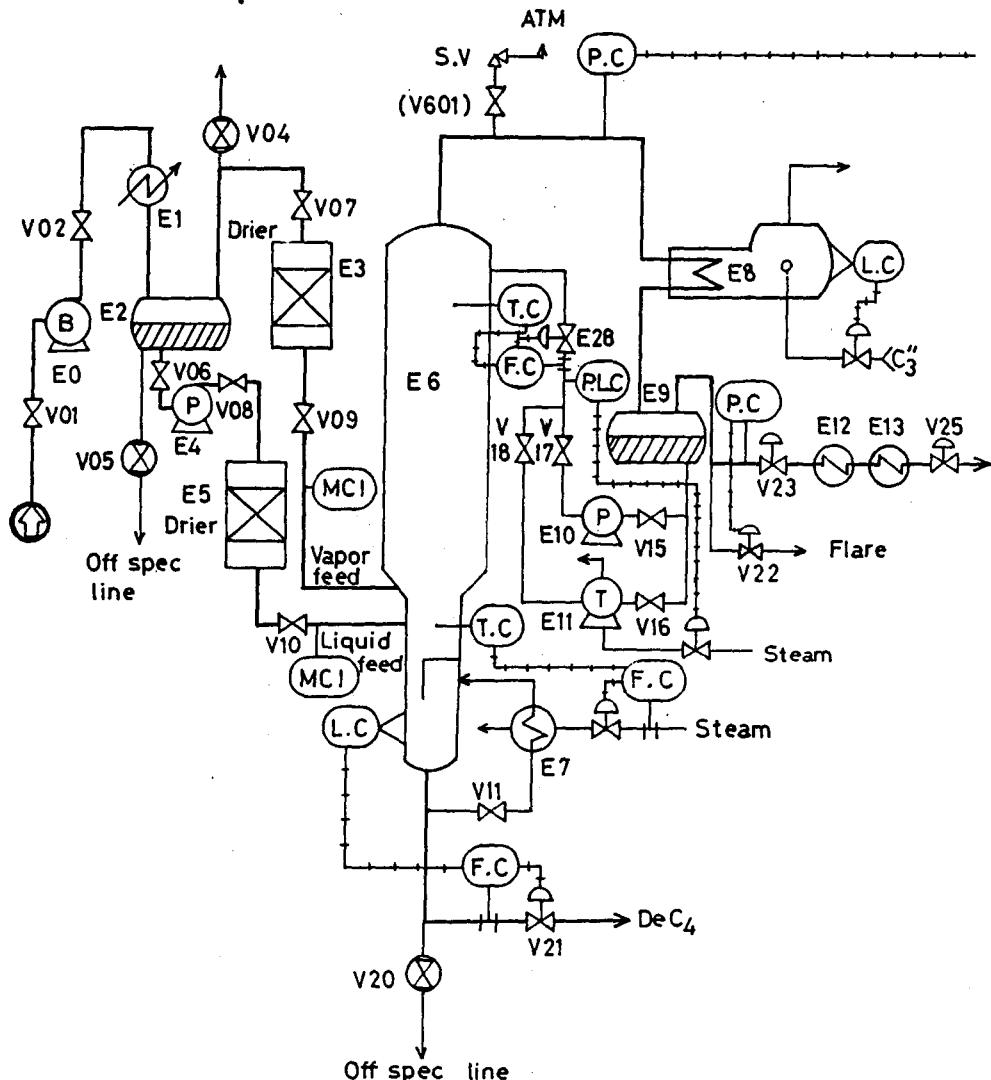


Fig.7 Flow sheet of model process

화학 플랜트의 고장원 탐색문제에 AI기술을 도입하여, 긴급시 OPERATOR의 상황인식 및 판단과정과 유사한 방법으로 이상원인을 탐색하는 컴퓨터시스템을 개발하였다. 본연구에서는, 「SCOPE」의 계층구조를 이용하여, 프로세스의 상태와 거동을 표현하였으며, MODEL PLANTDP에 적용하여 그 유효성

을 검증하였다. 이러한 방법론을 활용하여, 현장 운영원의 의사결정과정을 지원할 수 있는 조업지원 시스템의 개발이 가능해졌다고 본다. 향후의 검토 과제로는 복합고장에 관한 문제, 시간의존 정보 및 FUZZY 정보를 취급하는 문제가 남아있다.

### 참고문헌

1. Hwang,D.S.,Journal of KIIS,7,2,pp.14(1992)
2. Hwang,K.S.,S.Tomita and E.O.'shima:DAG-AKU

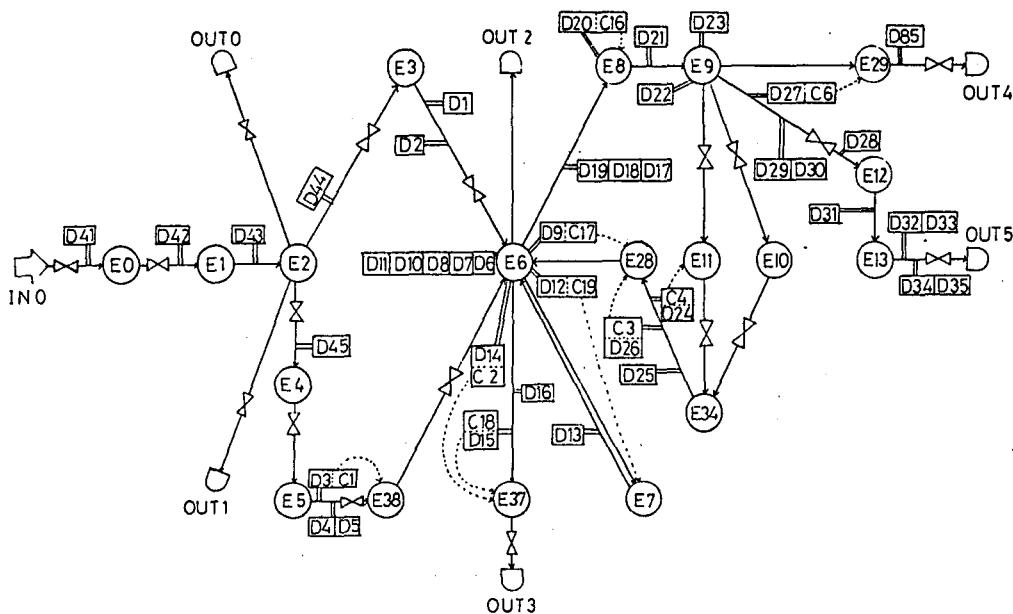


Fig.8 Graphical representation of model process

- KOGAKU RONBUNSHU,14,6,pp.728(1988)
3. Tomita,S.,K.S.Hwang,E.O.'shima and Colin Mcgreavy:J.Chem.Eng.Japan,22,4,(1989)
  4. Hwang,K.S.,S.Tomita and E.O.'shima:KAGAKU RONBUNSHU,16,2,pp.343(1990)
  5. Winston,P.H., "Artificial Intelligence", Addison-Wesley(1984)
  6. O'shima,E.:Comp. Chem. Eng.,7,pp.311(1983)
  7. O'shima,E.:J.Chem.Eng.Japan,11,pp.390 (1975)
  8. Davis,J.F.:FOCAPO-87,Park City, Utah (1987)
  9. Dramer,M.A.,B.L.Palowitch:AIChE,33,7, pp.1067-1078(1987)
  10. Venkatasubramanian,V.,S.H.Rich:Comput. Chem.
- Eng.,12,9(1988)
11. Andow,P.,PLANT/OPERATION PROGRESS, 4, 116(1985)
  12. Andow,P.K.,Less,F.P.:Trans.Instn.Chem. Eng., 53,pp.195(1975)
  13. Yoon,E.S.:World Cong.III Ckhem.Eng.,TOKYO, pp.1088(1986)
  14. Dim,C.J.,J.K.OH,E.S.Yoon :HWAHAK CONGHAK, 28,4,pp.417-429(1990)
- 1isp2> (scope)  
 ##### Let's start making primitive-scope! #####  
 # # #  
 \*PRIMITIVE-SCOPE-INSTANCE\*

(S01 S04 S05 S020 S021 S022 S025 E0 E1 E2 E3 E4 E5  
 E6 E7 E8 E9 E10 E11 E12 E13 E28 E29 E34 E37 E38 S1 S2  
 S3 S4 S5 S6 S7 S8 S9 S10 S12 S13 S14 R15 R16 R17 R18  
 R19 R20 S23 S24 S25 S26 S27 S51 S52 R53 R57 S57 S58  
 D1 D2 D3 D4 D5 D6 D7 D8 D9 D10 D11 D12 D13 D14 D15  
 D16 D17 D18 D19 F20 D21 D22 D23 D24 D25 D26 D27  
 D28 D29 D30 D31 D32 D33 D34 D35 D41 D42 D43 D44  
 D45 D85 C1 C2 C3 C4 C6 C16 C17 C18 C19)

\*\*\*\*\* Blocks are made. \*\*\*\*\*

\* BLOCK-LIST \*

(BL1 BL2 BL3 BL4 BL5 BL6 BL7 BL8 BL9 BL10 BL11 BL12  
 BL13 BL14 BL15)

\*\*\*\*\* Recycles are made. \*\*\*\*\*

\* RECYCLE-LIST \*

(RC1 RC2 RC3 RC4 RC5 RC6 RC7)

# # # # # Let's start making functional-scope! # # # # #

# #

\*FUNCTIONAL-SCOPE-INSTANCE\*

(F1 F2 F3 F4 F5 F6 F7 F8 F9 F10 F11 F12 F13 F14 F15 F16 F17  
 F18 F19 F20 F21 F22 F23 F24 F25 F26 F27 F28 F29  
 F30 31 F32 F33 F34 F35 F36 F37 F38 F39 F40 F41 F42  
 F43 F44 F45 F46 F47 F48 F49 F50 F51 F52 F53 F54 F55  
 F56 F57 F58 F59 F60 F61 F62 F63 F64 F65 F66 F67 F68  
 F69 F70 F71 F72 F73)

\*\*\*\*\* A11 scopes in the model plant are generated. \*\*\*\*\*

#### FIG.9 SCOPES GENERATED BY THE SYSTEM

1isp2) (FAULT-DIAGNOSIS)

\*\*\*\*\* Select the mode in the following four modes (1 or 2 or  
 3 or 4) \*\*\*\*\*

1. System checks the troubles of the units connected with the  
 \*alarm-detector\*.

2. System checks all the troubles of the units in the sub-func-

tional scopes

connected with the \*alarm-detector\*.

3. System checks all the troubles in the related main-functional  
 scopes.

4. System checks all the troubles in the model process.

2

\*Alarm-detector\* is as follows. => (D14 D15 C2 C18)

Units connected with \*alarm-detector\* are as follows.

=> (E6 E33 E8)

\*\*\*\* Let's check the trouble of detector. \*\*\*\*

=> There are no abnormal detectors.

\*\*\*\* Let's check the troubles of the units (E6 E33 E8) \*\*\*\*

Consider the fault NIL of E6

Consider the fault NIL of E33

Consider the fault (COOLING-MEDIUM-FAILURE COOL-  
 ING-MEDIUM-FAILURE%) of E8

=> Now starting the qualitative simulation on COOLING-ME-  
 DIUM-FAILURE of E8 ==

=> Simulation failed!!.

=> Now starting the qualitative simulation on COOLING-ME-  
 DIUM-FAILURE of E8 ==

=> Simulation failed!!.

\*\*\*\* Let's check the troubles of the units in the sub-functional  
 scopes

connected with the \*alarm-detector\*. \*\*\*\*

Consider the fault of (CONTROLLER-ABNORMAL) of E37

=> Now starting the qualitative simulation on CONTROLLER-  
 ABNORMAL of E37 ==

=> Simulation is completed!! . Simulation results are as fol-  
 lows.

# # # # Forward chaining rule links are as follows. # # # #  
 #

\*\*\*\* TrueLoop rule of EO \*\*\*\*

(IR NIL ((S1 (PHASE GAS) (FLOW 8920 9120) (PRESS 9.8 10.

```

1) (TEMP 32 36))) (C1 -5 5)
THEN ((S2 (TEMP 41 44) (PRESS 11.5 12.2)) AR ((S1
(S2)))) :: (C2 5 NIL)
:: # # # Fault-candidates are CONTROLLER-ABNORMAL or
**** Arc nstates of S1 **** E37 # # # #
(ID=> T FLOW=> (8920 9120) PRESS=> (9.8 10.1) TEMP
=> (32 36) Terminate the trouble-shooting? (y/n)
COMP=> (H2 H20 C1 C2 C3 C4 C5 C2H2) PHASE=> GAS
:: **** Trouble-shooting is terminated!!.. ****
1 isp2>
**** Detector states are as follows. ****
(D1 8500 8640)
(D2 8.3 8.5)
:: **** Controller states are as follows. ****

```

Fig.10 An example of fault-diagnosis by the system.