

보일러 플랜트의 위험상태 예측을 위한 지식표현에 관한 연구

A Study on the Knowledge Representation for the Recognition of Hazardous Conditions in Boiler Plant

허보경*·안대명*·황규석*

Bo-Kyeng Hou·Dae-Myung An·Kyu-Suk Hwang

ABSTRACT

Occasionally, many chemical plants experienced unexpected shutdown and suffered serious economic loss caused by boiler accidents due to mis-operations during the start-up or shutdown.

A strategy to prevent such accidents is proposed here by using the form of frame for the recognition of all needed conditions, i.e., the states of the boiler, hazardous or dangerous conditions, each level conditions, transition network and heuristic knowledge of human operators.

The expert system based on this strategy is considered to be an available method to predict all of the hazardous conditions in boiler plants.

1. 서 론

화학공장에서 각 공정에 에너지와 스팀을 공급해 주는 스팀보일러는 큰 비중을 차지하고 있으며, 스팀보일러의 조업은 타 공정에 큰 영향을 미치게 되어 있다. 또한 보일러는 가스나 기름을 연료로 사용하고 있기 때문에 화재 및 폭발의 위험성을 내포하고 있으며, 특히 Start-up, Shutdown시에는, 운전의 복잡성 때문에 폭발의 위험이 크므

로 안전상 주의를 요한다.

근래 보일러 플랜트는 점점 대형화, 복잡화되고 있으며, 보일러 운전제어의 고도화를 통한 에너지 절약 및 안전, 재해방지, 공해방지 등을 시도하고 있으므로 시스템의 안전성, 신뢰성을 확보하는 문제가 큰 과제로 등장하고 있다. 소형보일러에서는 시퀀스제어에 의한 자동화가 이루어지고 있으나, 대형보일러의 경우, 시동 조작이 대단히 복잡

* 부산대학교 화학공학과

하여 운전관리가 자동화하지 못하고 현장운전원의 경험에 의존하고 있으며, 이러한 이유로 운전관리의 미숙으로 인한 사고가 전체 사고원인의 대부분을 차지하고 있는 실정이다^{1~3)}.

따라서 본 연구의 목적은, 스팀보일러 플랜트의 에너지 절약과 안전성 확보를 위한 전문가 시스템을 개발하는데 있다. 즉, 보일러 플랜트의 운전관리 미숙(오조작, 오판단)으로 인한 사고를 미리 예방할 수 있는 운전 지원 전문가 시스템을 개발하고자 한다³⁾.

본 연구에서는 이러한 운전지원시스템 개발의 전단계 연구로, 오조작으로 인한 위험상태를 예측하기 위한 지식표현법에 관한 연구를 수행하였다. 즉, 조작전에 미리 조작에 대한 보일러의 상태와

상황을 미리 모사하고, 일어날 수 있는 위험상황을 예측하기 위해서, 현장 운전원의 경험적인 지식(대상 보일러 플랜트의 구조 및 기능상태와 거동에 관한 정상적인 인식방법, 위험발생 가능성조건 등)을 인공지능의 기법을 이용하여 정리하고 효율적인 상황인식과 위험성 예측을 위한 지식의 표현기법에 대한 연구를 수행하였다^{4~7)}.

2. 기본 개념

보일러 플랜트에서 발생하는 대부분의 사고가 조작의 예비조건을 만족하지 못한 상황에서 조작을 행하는 경우와 운전원의 오조작으로 인해서 발생하고 있다. (Fig. 1)

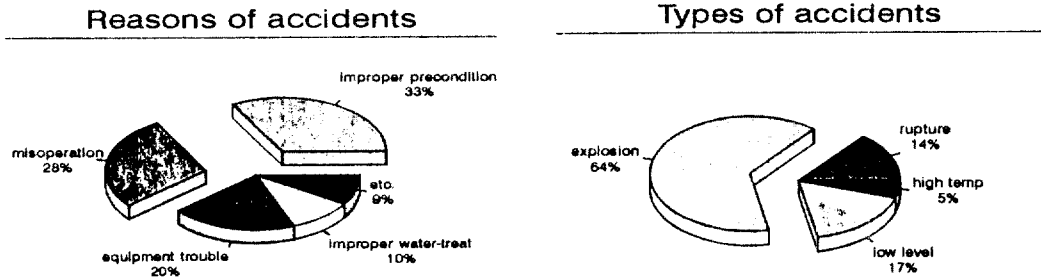


Fig. 1 Types of accidents in boiler plant

보일러에 오조작이 행하여 저서 인터락 조건에 해당하면 인터락 로직에 의해서 연료계통에 인터락이 걸려 연료가 차단된다. 연료가 차단되면 보일러가 Shutdown되고 보일러의 스팀을 공급받는 화학 Process도 따라서 Shutdown되므로 막대한 손실을 초래하게 된다. 이와 같이, 보일러의 안전한 운전을 위해서 설치되어 있는 기존의 인터락 로직으로는 오조작으로 인한 사고를 사전에 예측할 수 없게 되어 있다.

이런 부류의 사고를 사전에 예방하기 위해서는, 먼저 조작을 행하기 앞서서 미리 조작에 따른 보일러의 상태변화를 모사한 다음, 보일러의 전체상황 변화과정을 인식하고, 각 기기장치의 상태, 보일러의 상황과 상황의 변화과정에 대한 정보 및 위험발생 가능성 조건을 이용하여, 조작에 의하여 변화된 보일러의 상황이 위험조건을 침범하는지 여부를 체크할 수 있는 시스템의 개발이 필요하다.

본 연구에서 대상으로 하고 있는 보일러 플랜트

는 석유화학 공장의 유틸리티 시스템에서 일반적으로 사용되는 드럼형태의 보일러이다. 보일러 플랜트의 주요 구성요소는 보일러, 헤더, 파이프이며 다시 보일러는 상부드럼, 하부드럼, 하강관, 상승관, 버너 그리고 과열기로 구성되어 있다. (Fig. 2)

급수는 급수 펌프에서 보일러의 압력까지 가압되며 절탄기(Economizer)를 통해 예열된다. 절탄기에서는 보일러 내에서 사용된 후의 연소 배기 가스의 열을 이용하며, 예열된 급수는 상부드럼으로 들어가는데 이때 급수의 온도는 상부드럼의 압력에서의 포화 온도보다 약간 낮은 온도를 유지하게 된다. 상부의 드럼의 물은 하강관을 통해 흘러내려와서 하부드럼으로 내려가게 되며 하부드럼의 물은 상승관을 통해 올라가면서 관으로 부터 열을 전달받아 일부가 수증기로 된다.

과열기는 수십개의 가는 튜브로 이루어져 있으며 1차 과열기, 2차 과열기로 나누어져 있다. 버너

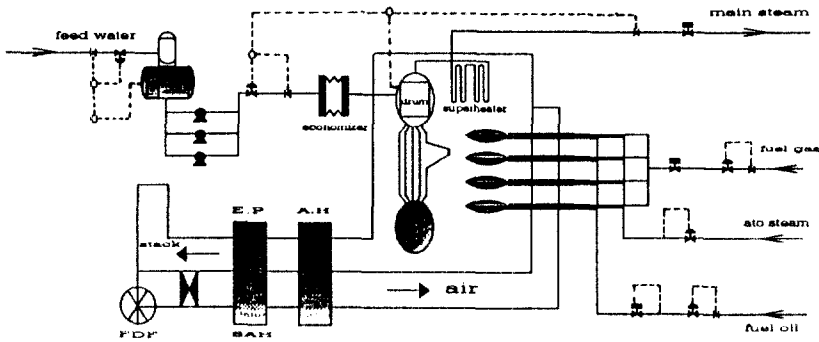


Fig. 2 Structure of the boiler plant

에서는 상승관 뿐만 아니라 과열기에도 열을 전달 하며 이 열이 수증기를 가열하여 과열 증기로 바꾼다. 기름, 가스는 각 라인을 통하여 버너로 유입되고, 기름을 분산시키는 역할을 하는 Atomizing steam은 Atomizing steam 라인을 통하여 버너로 유입된다. 그리고 공기는 F.D.F를 통하여 들어와서 각 예열기를 거쳐서 버너 주위로 유입된다.

3. 플랜트의 구조 및 상태 표현방법

보일러 플랜트의 결합구조는, 공정변수의 값을 변화시키는 모든 요소(밸브, 장치)와 Separating point(분리되는 곳)와 Mixing point(혼합되는 곳)를 Node로 나타내고 Node와 Node사이의 Pipe를 Arc로 나타낸다. 대상구조의 결합구조는 Node와 Arc로 나타낸 유향그래프로 나타낸다.(Fig. 3)

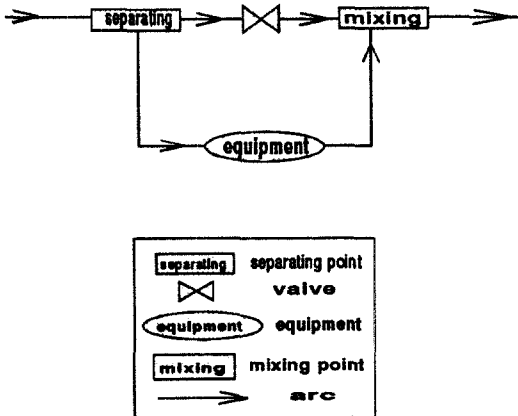


Fig. 3 Graphical representation of the process structure

보일러의 상태와 상황의 변화는 각 Arc와 Node의 공정변수들의 값과 장치들의 운전 정보, Arc와 Node의 집합으로 이루어진 물질 흐름경로인 Path의 상태에 의해서 표현되는 상황의 정보를 이용하여 인식할 수 있다.

① 플랜트의 결합관계 및 기기장치의 상태와 거동의 표현은 각각의 속성변수에 그 정보가 저장되게 된다.(Table 1)

Table 1 Property variables of arcs and nodes

Property variables of arcs and nodes	
Temperature	temp
Pressure	press
Flow rate	flow
Phase	phase
Components	comp
Open, on/close, off	apval
Functional rules	funcop
Input and output arcs	arc
Functional utility	func-utility
Working state	working ?
Range of operational conditions	op-constraint
Constraints before operation	pre-constraint

② 그리고 조작에 의해 형성되는 Path(상류측에서 하류측으로 물질이 흐를 수 있는 경로)상태에 대한 정보를 나타낼 수 있는 속성리스트를 마련한다.(Table 2)

Path의 각 속성변수는, 어떤 조작을 보일러 플랜트에 행하기 전에 각 Path가 보유하고 있던 Open/Close상태에 대한 정보(Before)와 조작 후의 상태에 대한 정보(After), 그리고 그런 Path가 Open된 적이 있는가를 나타내는 정보(Id)가 있다.

Table 2 Property variables of paths

Property variables of each path	
Components(node, arc)	path
Open/close state of path before an operation	before
Open/close state of path after an operation	after
The path was opened once	id

이와 같은 속성변수들은 조작에 따른 상황의 변화 과정을 인식하는데 사용된다. 즉 상태변화에 따른 위험성을 예측하기 위해서 조작전의 상황과 조작 후의 상황을 인식하고 있어야 위험성을 예측하는 것이 가능해 진다.

4. 상태 인식 및 상태변화 모사방법

조작에 따른 보일러의 상태를 인식하기 위해서는,

- 1) Node와 Arc의 속성변수들의 값을 참조하여 각 Node 와 Arc의 상태를 인식
- 2) Path의 상태 인식은 Path상의 모든 요소(Node 와 Arc)가 모두 Open상태이면, 그 Path는 Open되었다고 인식
- 3) 노드의 작동상태 인식은 Node의 개/폐와 기능 유틸리티의 작동상태를 살펴서 인식한다. (Table 3)

Table 3 Patterns of working state

open/close of node	working state of func-utility	working state of node
open	working	working
open	no func-utility	working
close	no func-utility	not working
open	not working	not working
close	working	working

장치(Node)에 조작이 행하여 지면, 조작에 의해서 보일러의 상태는 변하게 된다. 이때 조작에 따른 보일러의 상태 변화 모사는 각 Node의 기능연산물을 이용하여 공정의 상태를 변화시키게 된다. (Fig. 4)

각 Node의 기능연산물은 다음과 같은 형식을 취하고 있다.

(IF ((func-utility의 작동상태)
(node의 작동상태)

(입력 arc 상태 list))

THEN (node의 상태 List) (출력 arc 상태 list)
AR (입출력 arc 대응 관계))

이것은, Node에 들어오는 입력 Arc의 상태, Node 작동상태, 기능 유틸리티의 상태가 IF-PART에 지정된 상태를 만족하면, 그때 유출되는 유체의 상태와 Node의 상태가 AR-PART의 입출력 Arc대응관계를 살펴서 THEN-PART의 (출력 arc상태 List)와 (node의 상태 List)에서 지정된 상태로 변화되는 것을 의미한다.

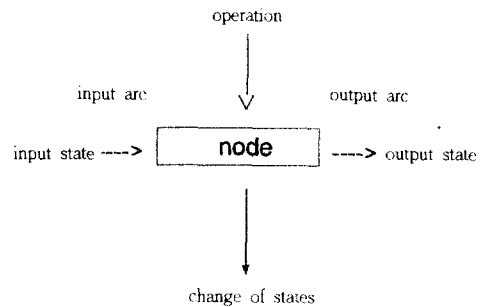


Fig. 4 Relationship between operations and process states

5. 운전 상황 인식방법

보일러 플랜트의 운전 상황을 인식하기 위해서 장치의 작동상태, 기능 유틸리티의 작동상태와 임의의 운전 상황에서 존재하는 Path, 상황의 인과관계에 대한 지식이 필요하다.

1) Path로 구성된 Frame에 의한 상황의 정의

① 본 연구에서는 각 장치의 기동조작에 필요한 관련조작 및 이러한 조작에 관계되는 Path의 상태를 인식하기 위하여 Start-up Frame을 도입하였다. (Table 4)

Table 4 Components of the Start-up frame

Start-up Frame of each element	
Pre-constraints of unit	Pre-check
Definition of situations for the start-up frame	Rel-state
Definition of dependent conditions	Message-state
Operation command	Message

Start-up 프레임의 구체적인 표현은 아래와 같다.

```
(Seam-turbine-start-up-frame
 (Pre-Check ((nil)))
 (Rel-State ((steam-turbine-drain-frame)
             (steam-turbine-trap-frame)
             (warming-up-frame)
             (steam-turbine-start-frame)))
 (message-state ((warming-up)
                 (steam-turbine-start)))
 (message ((steam-turbine on)
           (FDF on))))
```

위 표현의 구체적인 의미는 다음과 같다.

- (스팀 터빈의 start-up 프레임
 - (요소의 기동전 제약조건은 (없다))
 - (요소의 기동에 관련되는 프레임은
 - ((스팀 터빈 드레인 프레임)
 - (스팀 터빈 트랩 프레임)
 - (warming-up 프레임)
 - (main stream 프레임)) 이다)
 - (다른 요소의 작동에 영향을 미치는 상황은
 - ((warming-up에 관한 상황)
 - (main-stream에 관한 상황)) 이다)
 - (상황의 변화에 따라 행하여지는 조작은
 - ((스팀 터빈 작동) (FDF 작동)) 이다)))

② 위의 각 Start-up 프레임은 각 관련 프레임별로 다시 계층적으로 표현되며, 최하부 프레임은 구체적인 Path명으로 표현된다.

```
(각 요소의 start-up-frame명
 (rel-state-slot (rel-frame 명))
 (message-state-slot (상황 변수명))
 (message-slot (조작 명령))
 (rel-frame명
 (rel-state-slot (path-instance 명))
 (path-instance명
 (path (path상의 arc와 node 리스트)))
```

③ 각 운전상황에서 존재하는 Path는 임의 요소의 조 작전/후의 Path의 On/Off 상태에 관한 정보를 가지고 있으며, 이러한 Path의 On/Off상태는 그로 인하여 파악되는 운전상황의 인식에 사용된다. (Table 5)

2) Start-up 프레임을 이용한 운전상황 인식방법

① Start-up 프레임의 Pre-Check 항목에 기술되

어 있는 요소의 기동전 제약조건을 만족하는지 체크한다.

② Pre-Check항목을 만족하면 Rel-State 항목에 기술된 계층구조의 프레임의 운전상황을 조사한다. 각 프레임의 운전상황은 최하부 구조인 Path와 구성요소의 개/폐 및 기능 유틸리티의 작동상태를 살펴서 현재운전 상황을 인식하게 된다.

Table 5 Property variables of the operational situation

Property variables of the operational situation	
Arcs and nodes on path	path
The situation occurred before operation	before
The situation occur after operation	after
The situation occurred once	id

③ Rel-State에 규정되어 있는 모든 프레임의 운전상황에 대한 인식이 끝났으면, Message-State에 기술된 상황이 달성되었는지를 조사하여, Message에 정의되어 있는 요소 조작명령을 실행하게 된다.

④ 위와 같은 과정을 모든 Start-up 프레임에 대하여 실행하여, 전 공정에 존재하는 요소 및 Path의 운전 상황을 인식하여 상황변수에 기록해 둔다.

3) 상황전이 네트워크를 이용한 보일러 운전상황 인식

보일러 전체의 운전상황 인식을 위해서 Path의 상황변수와 Arc와 Node의 속성변수값의 조합으로 구성된 상황전이 네트워크를 이용한다. 각 상황변수들은 조작전/후의 상황에 대한 정보도 가지고 있다.

상황전이 네트워크의 구체적인 표현은 아래와 같다.

```
(IF (and (air-line-up-complete after t)
         (pre-purge-ready-complete after t)
         (FDF-normal-start-complete after t)
         (pre-purge-complete id nil))
```

THEN (pre-purge-complete after t))

위 표현의 구체적인 의미는 아래와 같다.

- (만약
 - (동시만족 ?
 - (조작후 air line의 line-up 완료)
 - (조작후 pre-purge조작 예비조건 만족)
 - (조작후 fdf가 정상운전되고 있다)

(조작전 pre-purge가 실행된적이 없다)
 그러면 (조작후에 pre-purge가 실행된다)
 또한, 각 상황변수의 속성변수(Before, After, Id)의 조합으로 각 운전상황의 시간적 변화상태를 파악한다.(Table 6)

Table 6 Property variables for time-variant situations

combinations of variables		meaning	time-variant variables
before	nit	Occurred after operation	occur
after	t		
id			
before	t	Disappeared after operation	disappear
after	nil		
id			
before		Occured once	once
after			
id	t		
before	t	In progress	ing
after	t		
id			
before		Not occurred yet	never
after			
id	nil		

Fig. 5에 운전상황 인식의 각 단계를 나타내었다.

- ① Start-up 프레임에 정의된 관련 프레임의 하부구조인 Path의 On/Off상태와 기능 유틸리티의 기동상태를 파악하여 당해 Path가 발휘하는 기능 상황의 실행여부를 인식한다.
- ② 기능 상황에 관한 정보, Node와 Arc의 속성 변수들의 값으로 구성되어 있는 상황 전이 네트워크

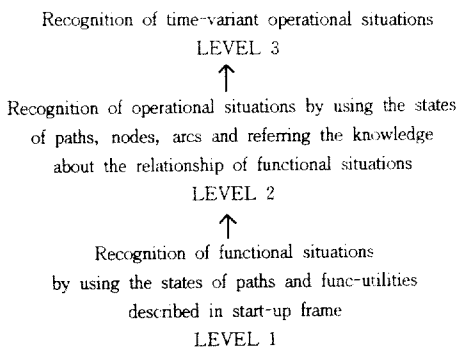


Fig. 5 Levels for the recognition of situations

크를 이용하여 보일러의 전체 운전상황을 인식하게 된다.

③ 1단계와 2단계에서 인식된 보일러 운전상황에 대한 정보를 이용하여 상황의 시간적 변화상태를 인식하게 된다.

8. 제약조건의 표현방법

장치제약조건은 장치를 안전하게 기동할 수 있는가를 나타내는 장치의 기동전 제약조건과, 안전하게 운전할 수 있는 운전범위를 나타내는 공정중 운전 제약조건으로 나타낸다.(Table 7)

Table 7 Property variables of constraints

Property variables	meaning
Pre-constraint	Constraint before operation
Op-constraint	Range of operational conditions

7. 위험발생 가능성의 표현방법

보일러 플랜트에서 일어날 수 있는 위험상황과 Trip 조건들, 위험한 상황으로 발전가능한 상황들을 정리하여 지식 Base로 표현하였다.

위험 조건은 Path의 상태 및 기능상황, 상황 전이 네트워크에 의해서 인식된 운전상황, Node와 Arc의 속성 변수들로 구성되어 있다.

위험발생가능성 조건의 구체적인 표현은 아래와 같다.

(IF (or (and (warming-up before nil)
 (steam-turbine-start before nil)
 (steam-turbine-start after t))
 (and (steam-turbine-start after t)
 (steam-turbine-start before nil)
 (steam-turbine-inlet-drain id nil)
 (warming-up before nil))))

THEN (occur-turbine-damage!)
 위의 구체적인 의미는 다음과 같다.

(만약
 (또는
 (동시에 만족?
 (조작전 warming-up 안됨)
 (조작전 steam-turbine start 안됨)
 (조작후 steam-turbine start 됨))

(동시에 만족?
 (조작후 steam-turbine start 됨)
 (조작전 steam-turbine start 안됨)
 (터어빈의 inlet drain 된적 없음)
 (조작전 warming-up 안됨)))
 그러면 (turbine의 파손 우려됨)

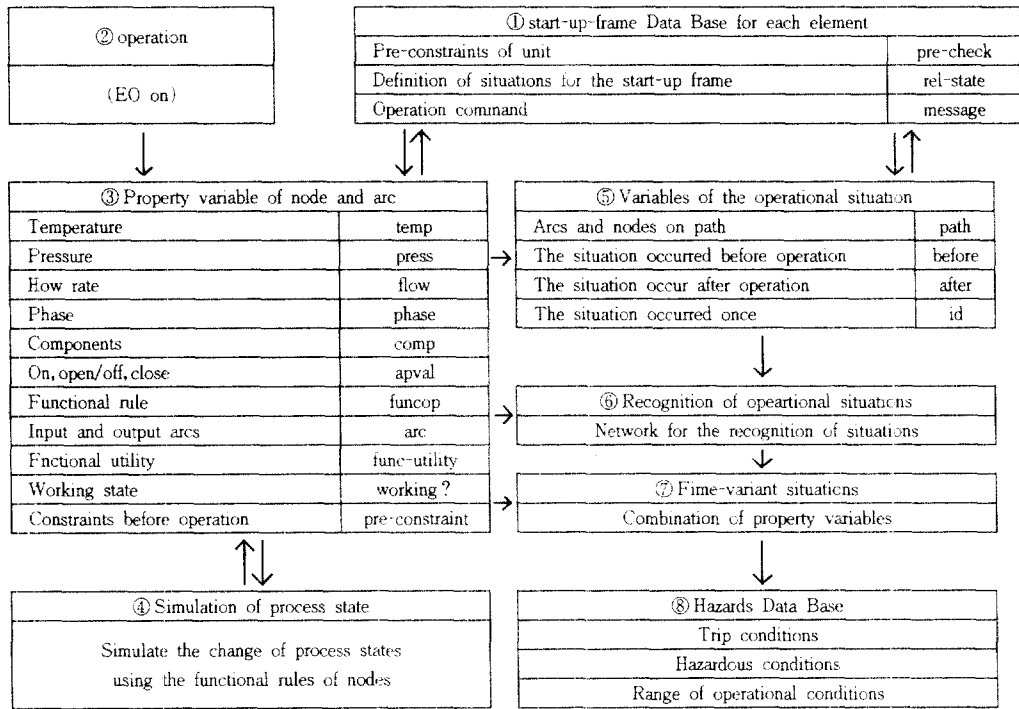


Fig. 6 The scheme of data flow

8. 상황인식 및 위험성 예측 처리과정

앞에서 살펴본 각 Level의 상황과 위험성의 표현방법을 이용하여 조작전에 미리 조작의 결과로 인한 상황의 인식과 위험발생 여부를 예측할 수 있다.

상황인식과 위험성 예측과정은 아래와 같으며, 그 때의 Data의 흐름은 Fig. 6와 같다.

① 대상공정의 결합구조, 기기장치들에 관한 제약조건, 운전에 관한 Frame Data, 대상공정의 초기상태에 관한 Data, 위험특성 Data Base 등이 시스템에 입력된다.

② 먼저, 보일러 플랜트에 임의의 한 조작(기기장치의 기동, 또는 밸브의 개/폐 등)이 행하여 진다.

③ 조작에 의해서 해당되는 Node 또는 Utility의 속성변수값이 변하게 된다.

④ 기기장치가 기동됨에 따라 공정내 흐름이 변하게 되고, 그에 따른 공정전체의 상태변화를 기능연산 Rule을 사용하여 모사하고 Node와 Arc의 각 속성변수값에 추가로 저장한다.

⑤ 변화된 각 Arc와 Node의 상태를 파악하여 각 요소의 Start-up 프레임에 관련된 각 Path와 기능유틸리티의 상태를 파악하고 현재의 기능상황을 인식한다.

⑥ 상황전이 네트워크를 이용하여 보일러 플랜트의 전체 운전상황을 인식한다.

⑦ 상황전이의 시간적인 변화과정을 인식한다.

⑧ Arc와 Node의 상태변수값, 각 상황의 속성변수값, 위험특성 Data Base를 사용하여 위험발생가능성조건을 검사하게 된다.

9. 결 론

보일러 플랜트의 운전관리의 미숙(오조작, 오관단)으로 인해 발생하는 Shutdown을 예방하기 위한 위험상태 인식에 관한 연구를 수행하였다. 본 연구에서는, 보일러의 상태 및 각 Level의 상황의 인식방법, 위험 발생가능성의 인식방법 등, 대상공정에 관한 상태인식법과 상황의 지식표현에 관한 기본적인 전략을 제시하였다.

보일러 플랜트의 위험발생 가능성 조건에 대한 지식을 일반화하였고, 본 연구에서 제시한 상황인식을 위한 표현법을 사용하여, 컴퓨터를 사용하여 사전에 조작에 의한 보일러의 위험성을 미리 예측할 수 있게 되었다.

본 연구는 한국과학기술연구원 우수연구센터인 공정산업의 지능자동화 연구센터와 에너지자원 기술개발 지원센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 지원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 1) Calandranis, J. & G. Stephanopoulos, S. Nunokawa : Diad-kit/boiler : on-line performance monitoring and diagnosis., Chemical Engineering Progress., pp. 60~68, January, 1990.
- 2) Alatiqi, I. M., and A. M. Meziou : Simulation and parameter scheduling operation of waste heat steam-boilers., Computerschem. Engng., 16, 1, pp. 51~59, 1992.
- 3) Fusillo, R. H., and G. J. Powers : Computer-aided planning of purge operations., AIChE Journal, 34, 4, pp. 556~558, 1988.
- 4) Hwang, K. S., S. Tomita and E. O'shima : On the development computer-based system for synthe-sizing chemical plant operating procedure. -Organization of knowledge for plant operation. -, KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU, 14, 6, pp. 728~736, 1988.
- 5) Tomita, S., K. S. Hwang, E. O'shima, Colin Mcgreavy : Automatic synthesizer of operating procedure for chemical plant by use of fragmentary knowledge., JOURNAL of CHEMICAL ENGIN-EERING of JAPAN, 22, 4, pp. 364~372, 1989.
- 6) Hwang, K. S., S. Tomita and E. O'shima : Automatic synthesizer of and operating procedure for chemical plant involving parallel operations., KAGAKU KOGAKU RONBUNSHU, 16, 2, pp. 343~353, 1990.
- 7) Hwang, K. S., S. Tomita and E. O'shima : Development of a computer-based system for synthesizing the operating procedure of a chemical plant., International Chemical Engineering, 31, p. 134, 1991.