

보일러 플랜트의 자동 Shutdown 시스템을 위한 지식표현

Knowledge Representation for the Automatic Shutdown System in Boiler Plants

송 한 영* · 황 규 석*

Han-Young Song · Kyu-Suk Hwang
(1996년 5월 28일 접수, 1996년 9월 20일 채택)

ABSTRACT

Shutdown of boiler plants is a dynamic, complicated, and hazardous operation. Operational error is a major contributor to dangerous situations during boiler plant shutdowns. It is important to develop an automatic system which synthesizes operating procedures to safely go from normal operation to complete shutdown.

Knowledge representation for automatic shutdown of boiler plants makes use of the hierarchical, rule-based framework for heuristic knowledge, the semantic network, frame for process topology, and AI techniques such as rule matching, forward chaining, backward chaining, and searching. This knowledge representation and modeling account for the operational states, primitive operation devices, effects of their application, and planning methodology. Also, this is designed to automatically formulate subgoals, search for positive operation devices, formulate constraints, and synthesize shutdown procedures in boiler plants.

1. 서 론

화학공장 및 이에 부속되어 있는 Utility 공장의 운전 자동화에는 3가지 단계가 있다. 첫째는 정상상태 운전의 자동화이고, 둘째는 비정상상태 운전의 자동화이며, 셋째는 운전중 이상이 발생했을 때 이에 대처하는 운전의 자동화이다. 여기서 공

정이 어느 정도 정상상태에 도달한 이후의 운전은 최근의 공정제어 이론의 발달과 컴퓨터의 사용 등에 의하여 거의 완벽하게 자동화되어 있지만, 공정의 개시조업조작(Start-up) 또는 조업중단조작(Shutdown) 등과 같은 비정상상태시의 운전이나 공정에 이상상태가 발생했을 시에 그에 대처하는 운전의 자동화는, 임의의 조작에 따른 공정 상태

* 부산대학교 화공과

의 변화를 예측하기 어려울 뿐만 아니라, 각각의 조업의 목적과 특성, 각 기기장치의 조작에 따른 제약조건, 임의의 상태변화에 따른 위험상황의 발생 등 고려해야할 점이 운전의 목적에 따라 모두 틀리므로 자동화를 위한 실용화 연구는 거의 시도되지 못하고 있다. 이 중에서 화학공정의 개시조업(Start-up)의 자동화에 관한 연구는 Rivas, Powers, Stephanopoulos 등^{1~8)}에 의하여 여러 가지 인공지능 기법을 이용하여 기초적인 연구가 이루어지고 있으나, 실제 공장에서 발생하는 여러 가지 제약조건의 다양성과 복잡성 때문에 실용화되는 경우가 매우 드물다.

한편, 조업중단조작(Shutdown)의 운전 자동화에 대한 연구는, Shutdown 운전이 단순히 Start-up 운전의 역방향의 운전이 아닐 뿐만 아니라, Start-up 운전이 어느 정도 운전의 지침과 방향이 정해져 있는 반면에, Shutdown은 정전 또는 고압 및 고열 등 비상사태 발생 시에 신속하고 안전하게 전체 공정을 원하는 조업중단상태로 이끌어 가야 한다는 점에서 Start-up운전보다 힘들다고 할 수 있다. 또한, 사용되는 운전지식이나 제약조건 등이 Start-up 운전과 모두 다를 뿐만 아니라 조작의 개념이나 운전상태 및 상황이 모두 다르다. 이러한 관계로 현재까지 Shutdown 운전의 자동화에 관한 연구는 거의 찾아볼 수 없는 것이 현실적이다. Shutdown 운전의 실패로 인한 Boiler Plant의 파손은 에너지를 다량 소비하는 석유화학공장 등의 조업에 치명적인 손상을 미치고 그로 인한 피해도 엄청나므로 안전하게 공장을 Shutdown할 수 있는 운전의 자동화에 관한 체계적인 연구가 필요하다.

보일러 플랜트의 Shutdown은 장치운영계획에 의한 정기적인 Overhaul시에 하는 Routine Shutdown과 보일러 및 보일러 부속장치의 이상으로 계속적인 운전이 불가능할 경우에 하는 Emergency Shutdown이 있다. 그런데 이러한 보일러 플랜트의 Shutdown 운전은 비정상 상태이고 운전이 매우 복잡하고 제약조건이 많으므로 운전원의 오조작시 Shutdown하는 중에 Drum의 과열 및 Furnace 내 연소되지 않은 연료가 축적되어 폭발이나 화재 등과 같은 사고가 발생하는 경우가 있다. 또한, 플랜트가 정상적으로 Shutdown되지 않았을 경우, 당시에는 문제가 되지 않더라도 재 Start-up시 큰 사고로 이어질 수 있다. 그러므로 Shutdown 운전시

에, 공정의 정상운전상태에서 플랜트를 정상적으로 Shutdown하기 위한 조작을 결정하여 운전원에게 제시해 주는 시스템이나 컴퓨터가 자동으로 Shutdown하는 시스템의 개발이 필요하다.

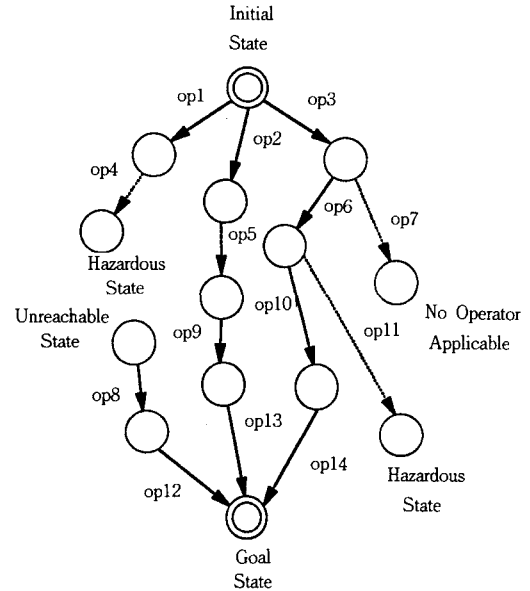


Fig. 1 Schematic diagram of a typical planning problem

2. 기본지식 및 대상공정에 대한 지식표현

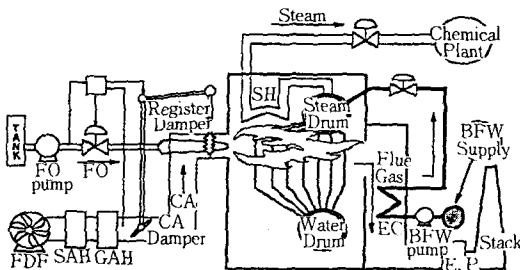
Fig. 1은 임의의 초기상태에서 목적상태에 도달하기 위한 조작순서를 찾기 위한 Planning 문제의 일반적인 구조도이다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 임의로 조작할 경우에는 목적상태에 이르기 전에 위험상태에 이르거나, 조작자가 더 이상 조작할 수 없는 상태에 빠지게 된다. 그래서 이러한 상태에 빠지지 않기 위한 효과적인 조작 탐색 방법이 필요하다. 즉, op2-op5-op9-op13이나 op3-op6-op10-op14와 같이 안전하게 목적상태로 도달하게 하는 조작을 탐색해야 한다. Fig. 1과 같은 구조는 화학공장의 Start-up 조작합성 또는 Shutdown 조작합성들과 같은 모든 Planning문제에서 발생하며, 각 대상작업의 특성에 따라 구체적인 접근방법 및 시스템의 실행방법이 달라진다.

본 연구에서는 대상공정인 보일러 플랜트의 Shutdown 운전에 관한 일반 지식 및 운전원의 경험지식을 이용하여 Shutdown 조작을 탐색할 수 있

도록 하였다. 보통 운전원들은 자신의 운전지식을 가지고 중간목표(Subgoal)들을 1차적으로 설정하고, 다음에 각각의 중간목표를 달성하기 위한 적절한 조작기구들을 찾아서 각 장치 및 조작기구의 제약조건을 범하지 않는 한도 내에서 조작을 실시하여 원하는 목적상태에 이르고 있다. 이러한 운전원의 지식과 사고과정을 활용하기 위해서 Process에 대한 지식이나 경험지식을 의미 네트워크(Semantic Network), Frame, Rule 등으로 표현하였다. 그리고 이러한 지식 표현법은 운전원의 사고과정을 Searching, Rule Matching, Forward chaining과 같은 인공지능기법으로 대체하는 데 있어서 가장 중요한 역할을 하게 된다.

2.1 보일러의 구조

보일러 플랜트는 크게 공기 유입부, 보일러수(Boiler Feed Water) 유입부, 연료유입부, 버너, 드럼으로 구성되어 있다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 보일러의 Feed Water는 Pump에 의해 공급되는데, 에너지의 효율적인 사용을 위해 절탄기(Economizer)에서 예열되어 상부드럼으로 유입되게 된다. 유입된 물은 버너의 화염에 의해 증발하여 SH(super heater)를 거쳐 고압, 고온의 steam이 되어 steam이 필요한 각 화학공정에 유입되게 된다. 한편, 버너의 firing에 필요한 공기는 FDF(Forced Draft Fan)에 의해 SAH(Steam Air Heater)와 GAH(Gas Air Heater)을 거쳐 Furnace로 유입되게 된다. 연료로는 Oil과 Gas가 버너로 직접 유입되게 되는데, 이때 Atomizing Steam은 연료 Oil을 분사시키는 역할을 하게 된다.



SH : Super Heater	SAH : Steam Air Heater
FO : Fuel Oil	GAH : Gas Air Heater
CA : Combustion Air	FDF : Forced Draft Fan
EP : Electrostatic Precipitator	BFW : Boiler Feed Water
EC : Economizer	

Fig. 2 Layout of the boiler plant

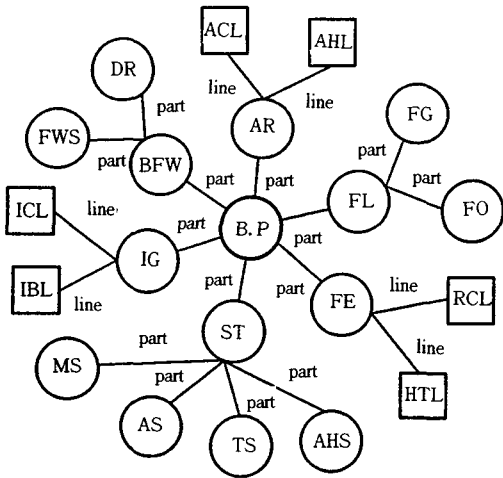
2.2 보일러 플랜트의 Shutdown 운전절차

다음은 화학공장의 Utility로서 대량의 Steam을 발생시키는 어떤 보일러 플랜트에 대한 Shutdown 운전절차를 개략적으로 나타낸 것으로서, Shutdown 운전에서 중요한 위치를 차지하고 있는 Fuel Gas와 Fuel Oil Burner의 Firing 중지 운전을 중심으로 서술하였다.

- 1) F.G Flow Controller의 Mode를 Auto→Manual Mode로 전환한다.
- 2) F.G Cock Valve를 10초에 10도의 각도로 완전히 잠구어서 F.G Burner의 Firing을 중지해 나간다.
- 3) F.G Burner의 Firing을 중지하면서 F.G Flow Controller가 0.5~0.8Kg/cm² 범위를 유지하도록 조작해야 한다.
- 4) 위의 범위를 벗어날 경우 F.G Flow Controller로 이 범위를 유지하도록 조절한다. 이 때 Controller의 조절속도는 2초에 1%의 속도로 한다.
- 5) F.G Burner의 Firing이 중지되면 Gas Trip Valve(GTV)를 닫고, Vent Valve를 열어 Pipe 내의 F.G를 Vent해야 한다.
- 6) F.G Burner Firing 중지후 F.O & Atomizing Steam Throttle Valve를 완전히 잠구어 F.O Burner의 Firing을 중지시킨다.
- 7) F.O Block Valve, F.O Trip Valve, Atomizing Steam Trip Valve를 잠구어 F.O Supply를 완전히 차단한다.
- 8) Ignitor Switch를 눌러 Start하고, Ignitor Gas Valve를 Gauge상으로 1.0Kg/cm²가 되게 연다.
- 9) Atomizing Steam Throttle & Trip Valve, F.O Throttle Valve를 적절하게 열고, Scavenge Valve를 완전히 열어 잔류 F.O를 Scavenge한다.
- 10) Scavenge (or Purge)가 끝나면 Ignitor Switch를 Off한다.
- 11) F.O Firing이 중지된 후 기타 보조장치를 Shutdown하면, 플랜트 전체 Shutdown이 완료된다.

2.3 의미 네트워크 및 Frame에 의한 지식표현

보일러 플랜트의 구조를 의미적으로 인식하기 위해서 다음과 같이 part, line이라는 의미 변수를 가지고 의미 네트워크를 작성하였다(Fig. 3). 여



SYMBOLS AND LEGENDS	
AR	: AIR SUPPLY
FL	: FUEL SUPPLY
FE	: FLUE GAS EXIT
ST	: STEAM PART
IG	: IGNITOR GAS SUPPLY
BFW	: BOILER FEED WATER SUPPLY
ACL	: AIR CONTROL LINE
AHL	: AIR HEATING LINE
FG	: FUEL GAS SUPPLY
FO	: FUEL OIL SUPPLY
RCL	: REMOVE CONTAMINANT LINE
HTL	: HEAT TRANSFER LINE
AHS	: AIR HEATER STEAM PART
TS	: TURBINE STEAM PART
AS	: ATOMIZING STEAM PART
MS	: MAIN STEAM PART
IBL	: IGNITOR BURNER LINE
ICL	: IGNITOR CONTROL LINE
FWS	: FEED WATER SUPPLY
DR	: DRUM

Fig. 3 A part of semantic network for the boiler plant

기서 part는 전체 플랜트 및 상위 PART를 구성하는 각 부분(part)을 나타내고 있으며, line은 각 part를 구성하고 있는 LINE을 나타내고 있다. 즉, 보일러 플랜트(B.P)는 AIR 공급부(AR), 보일러 급수부(BFW), 점화 GAS부(IG), 스팀부, FLUE GAS부(FE), 연료공급부(FL)로 구성되어 있음을 의미하고, 그 중 AIR 공급부는 AIR CONTROL LINE(ACL), AIR HEATING LINE(AHL)이 있음을 의미한다. 한편, 모든 LINE은 각 LINE의 역할에 따라 체계적으로 분류하였다.

이러한 LINE의 기능적인 분류 및 의미론적인 표현은 조작기구를 탐색하는데 직접적인 도움을 준다. (7장)

각 LINE을 구성하는 PIPE, VALVE 및 장치 등을 의미네트워크로 표현할 경우에는 표현상 어려움이 있으므로 PIPE-slot, VALVE-slot, EQUIPMENT-slot을 가진 Frame으로 표현함으로써 최말단의 기본 조작기구까지 나타내었다. 여기서 VALVE-slot은 하위 slot으로서 개도의 조절이 가능한 CV-slot과 가능하지 않은 CANT-CV-slot로 표현하였다. 그리고 대상공정상의 PIPE, VALVE, EQUIPMENT의 고유명칭이 각 slot의 구체적인 값으로 들어가게 된다.

3. 공정의 운전상태 및 기본 조작기구에 대한 지식표현

대상공정의 운전상태를 표현하거나 모사하기 위해서 편의상 대상공정을 Arc, Node, Path로 구분하는데, Arc은 파이프를, Node는 밸브, 장치, 혼합점, 분리점을, Path는 Arc와 Node의 일정한 결합에 의해 생성된 Route를 가리킨다. Table 1은 운전상태를 나타내는 Arc, Node, Path의 상태 속성변수들이다. 여기서 Arc, Node의 상태는 각각

Table 1 Property variables for the operational states

Property variables	Meaning
temp	Temperature of arcs and nodes
press	Pressure of arcs and nodes
flow	Flow rate of arcs and nodes
phase	Phase of arcs and nodes
comp	Components of arcs and nodes
level	Level of tanks and drums
apval	Open/Close or On/Off state of nodes
stem-position	Stem position of valves
func-rule	Functional rules of nodes
function	Functional model of valves
func-utility	Functional utility of equipments
working	Working state of equipments and functional utilities
pre-constraint	Constraints before operation
op-constraint	Operational constraints
post-constraint	Constraints after operation
arc	Input and output arcs of nodes
path-comp	Arcs and nodes on paths
path	Open/Close state of paths

의 속성변수값들을 참조하여 상태를 인식하며, Path의 상태는 각각의 속성변수와 Arc, Node의 속성변수값들의 조합으로서 공정의 운전상태를 인식하게 된다. 여기서 장치의 작동상태는 Node의 개/폐 상태와 기능 유틸리티의 작동상태에 따라 결정된다. 즉, Fuel Gas, Fuel Oil, Ignitor Gas, Atomizing Steam, Air, Boiler Feed Water 등의 공급 상태를 알 수 있다.

기본 조작기구(primitive operation device)란 플랜트의 상태 및 상황을 변화시킬 수 있는 기기를 말한다. 대부분의 플랜트에서는 조작기구로서 밸브, Controller, switch를 가지고 있다. 여기서 switch는 펌프, 점화기(ignitor), 압축기(compressor) 등과 같은 장치들을 작동하는 조작기구이다.

조작기구의 기능 및 조작방향, 조작속도, 조작시간 등을 알아야 조작기구의 실행으로 인한 상태변화를 예측할 수 있으므로 다음 Table 2와 같이 조작기구의 속성을 나타내었다.

Table 2 Property variables of the primitive operation devices

Valve	Controller	Switch
name	name	name
type	type	direction
stem-position	manipulated-variable	degree
direction	controlled-variable	constraints
speed	final-control-element	
operating-time	control-mode	
function	direction	
constraints	speed	
	operating-time	
	constraints	

여기서 속성변수 direction은 조작기구의 open/close 또는 on/off와 같은 조작방향을, 속성변수 operating-time은 조작기구의 조작시간을, degree는 switch의 조작정도, stem-position은 밸브 stem의 위치, speed는 조작기구의 조작속도를 나타내고 있다.

4. 조작기구의 실행에 따른 운전상태 변화 모사를 위한 지식표현

노드의 기능에 따라 노드의 입력 Arc의 상태는 노드를 통과하면서 출력 Arc의 상태로 바뀌게 된

다. 그런데 만일 노드에 조작기구의 조작이 가해졌을 경우 노드의 기능이 변하게 되고, 이로 말미암아 결과적으로 입력 Arc에 대한 출력 Arc의 상태도 변하게 된다(Fig. 4).

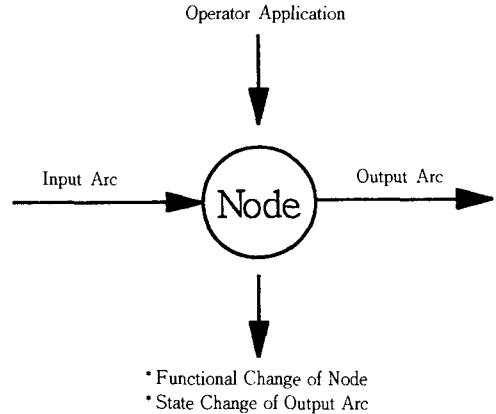


Fig. 4 Effects of the operator application

조작에 의한 노드의 기능변화와 이로 인한 출력 Arc의 상태 변화를 모사하기 위해 장치, 분리점, 혼합점과 같은 노드에 Rule에 의한 상태모사 방법을 적용하였으며, 밸브와 같은 노드에는 상태변수 추산모델이라는 함수를 사용하여 상태를 모사하였다.

먼저 Rule에 의한 상태모사 방법은 노드의 기능을 IF..THEN.. Rule로 표현하여 상태변화를 모사한 것이다. 구체적인 Rule의 형식을 보면 다음과 같다.

```
(Node (IF ((Node 작동상태)
            (Func-utility의 작동상태)
            (Input Arc의 상태))
        THEN ((Node의 상태)
              (Output Arc의 상태))
        AR (Input & Output Arc)))
```

이 Rule은 만일 현재 Node, Func-utility, 입력 Arc의 상태가 IF부를 만족하면, Node, 출력 Arc의 상태가 THEN부 이하로 변화된다는 의미를 가지고 있다. 즉, 각 노드별로 IF부와 부합되는(matching) Rule을 찾아서 연쇄적으로 상태를 모사시켜 가면 결국 전 공정에 대해서 상태를 모사할 수 있게 된다.

둘째로, 상태변수 추산모델에 의한 상태모사 방

법은 노드 중에서 밸브의 기능을 함수(상태변수 추산 모델)로서 나타내었다. 밸브의 기능을 결정하는 것은 밸브 stem의 위치이다. 즉, 밸브의 stem 위치에 따라서 변화되는 상태변수값이 다르다. 유량, 압력, 온도와 같은 출력 Arc의 상태변수값은 밸브의 stem 위치에 따라 다르므로, 상태변수값과 stem 위치와의 관계를 함수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\text{Flow-rate} = f_1(\text{valve-stem-position})$$

$$\text{Pressure} = f_2(\text{valve-stem-position})$$

$$\text{Temperature} = f_3(\text{valve-stem-position})$$

위식에서 보는 바와 같이 입력 Arc의 상태변수와 밸브의 stem 위치가 정해지면, 현장의 경험적인 함수식이나 이론적인 함수식에 의해 출력 Arc의 상태변수값이 바뀌게 된다. 이때 밸브가 조작된 후에 stem 위치는 다음 식에 의해서 계산된다. 조작 후 stem 위치 = (조작 전 stem 위치) + (operating time) × (open/close speed)

이렇게 각 노드에 대한 Rule과 함수에 기반을 둔 모델링을 통해 조작이 공정의 상태에 미치는 영향을 모사하여, 상태를 변화시킬 뿐 아니라 운전 상태를 예측할 수 있다.

5. Shutdown을 위한 SUBGOAL의 생성

현장의 운전원은 플랜트의 Shutdown운전에 대한 지식들을 가지고 있기 때문에 대부분 제약조건을 범하지 않고 정상운전상태에서 Plant의 Shutdown상태까지 대부분 안전하게 도달할 수 있다. 즉, 운전원은 Shutdown이라는 목표를 달성하기 위해서 Plant의 운전과 관련한 경험적인 지식에 근거하여 여러 가지 중간목표(Subgoal)들을 설정하고, 이 중간목표들을 단계적으로 달성해 나간다.

운전자가 설정한 중간목표들을 달성해 가는 방법을 살펴보면, 운전자는 Shutdown을 위한 중간목표를 달성하기 위해 직접적인 관계가 있는 조작기구(Positive Operation Device)들을 찾고, 그 조작으로 인해 어떤 상태가 일어날 것인가 예측하고, 그 조작이 안전한지 판별한다. 뿐만 아니라 환경에 어떤 영향을 미치는지, 또 에너지 효율면에는 적절한지 등에 대해서도 예측하고 판단한다. 이러한 추론과정을 통해서 운전원은 플랜트를 Shutdown하게 된다. 이 장에서는 보일러 플랜트

Shutdown의 첫번째 단계로서 중간목표를 생성하는 방법과 중간목표를 생성하기 위한 지식 표현법에 대해서 살펴보고자 한다.

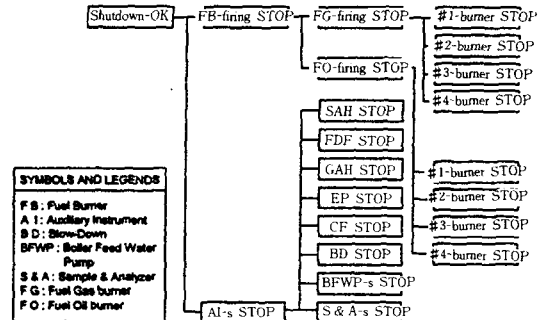
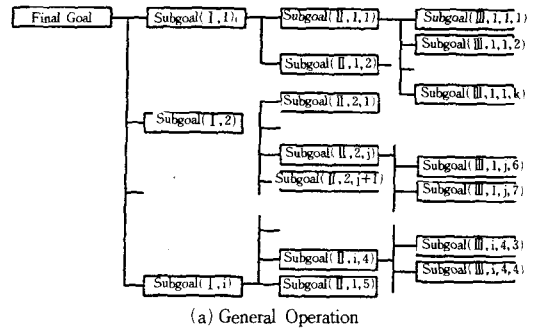


Fig. 5 Hierarchical structure for shutdown operation of the boiler plant

최종목표인 Shutdown 완료 상태를 이루기 위한 중간목표들을 계층적으로 나타내면 Fig. 5와 같다. 여기서 로마자 I, II, III, ...는 중간목표의 Level를 나타내며, i, j, k, ...는 각각 최종목표, Level I 중간목표, Level II 중간목표에 대한 하위 중간목표들의 순서를 나타내고 있다. Fig. 5(a)에서 보는 바와 같이 최종목표에 도달하기 위해서는 Level I의 중간목표들을 모두 달성해야 하며, Level I의 중간목표를 달성하기 위해서는 Level II의 중간목표를 달성해야 함을 알 수 있다. 결국, 가장 하위 Level의 중간목표들을 모두 달성하게 될 때 최종목표에 이르게 된다. 본 보일러 플랜트 Shutdown 운전의 중간목표를 계층화하면 Fig. 5(b)와 같다. 이러한 중간목표에 대한 계층 트리를 생성하기 위해서는 대상공정 지식 및 경험적인 지식을 가지고 최종목표를 기점으로 계층 트리의 Node를 확장시켰다.

최종목표에 대해 중간목표를 계층적인 Tree로

나타내기 위해서는 보일러 플랜트의 공정에 대한 지식과 운전원의 경험지식을 적절히 이용할 수 있도록 지식을 표현해 주어야 한다. 여기서는 운전원의 경험적인 지식은 Rule로, 플랜트 공정에 대한 지식은 속성변수 COMPNT로 표현하였다.

5.1 RULE에 의한 경험 지식의 표현

어떤 장치의 Shutdown은 그 장치를 이루는 모든 하부장치가 Shutdown하면 완료된다는 일반적인 운전 경험 지식을 다음과 같은 Rule로써 표현할 수 있다.

```
(RULE (IF ((ALL-COMPONENTS SHUTDOWN T))
        THEN (HIGHER-EQUIPMENT SHUTDOWN T)))
```

이 RULE의 구조를 보면 IF부와 THEN부로 이루어져 있으면 구체적인 형식은 다음과 같다.

1) IF부의 형식

(IF ((장치의 종류/장치의 운전목표/운전목표 도달 여부) (...)) ...)

2) THEN 부의 형식

THEN (장치의 종류/장치의 운전목표/운전목표 도달 여부)

그리고, 위 표현의 의미는 다음과 같다.

(규칙 (만일 (어떤 장치의 모든 구성요소-하부장치가 Shutdown 완료) 그러면 (그 장치는 shutdown 완료)))

5.2 속성변수 COMPNT에 의한 공정 지식의 표현

보일러 플랜트는 크게 연료 버너와 보조장치로 이루어져 있다. 여기서 연료버너는 또 다시 가스 버너(FUEL-GAS-BURNER)와 기름 버너(FUEL-OIL-BURNER)가 있는데, 플랜트에 따라 가스버너가 없는 경우가 있다. 또한 보조장치로는 FDF(Forced Draft Fan), SAH(Steam Air Heater), GAH(Gas Air Heater), EP(Electrostatic Precipitator), 보일러 급수 펌프(Boiler Feed Water PUMPS; BFW-PUMPS), 성분 분석기 등이 있다. 이러한 공정의 구조 및 장치를 COMPNT(component)라는 속성변수로서 다음과 같이 표현하였다. 이렇게 표현함으로써 보일러 플랜트의 구조가 조금씩 다르더라도 본 시스템을 광범위하게 사용할 수 있게 하였다.

```
(SETF 'FINAL-STATE' '(BOILER-PLANT SHUTDOWN))
```

```
(PUT BOILER-PLANT 'COMPNT '(FUEL-BURNERS)
                    (AUXILIARY-INSTRUMENTS)))
(PUT FUEL-BURNER 'COMPNT '(FUEL-GAS-BURNERS)
                  (FUEL-OIL-BURNERS)))
(PUT AUXILIARY-INSTRUMENTS 'COMPNT '((FDF) (SAH) (AH) (EP)
                                       (BFW-PUMPS) (SAMPLE-AND-ANALYZERS)
                                       (CHEMICAL-FEEDING) (CONTINUOUS-BLOWDOWN))) ...
```

5.3 SUBGOAL의 생성 알고리즘

위에서 표현된 지식 BASE을 이용하여 Fig. 5 (b)와 같은 계층적인 TREE를 만들 수 있다. 최종 목표에 대한 계층적인 구조를 형성하기 위한 알고리즘은 다음과 같다.

1) *FINAL-STATE*(최종목표상태)가 무엇인지 알아낸다.

최종목표상태는 지식 BASE 중에 (SETF *FINAL-STATE* '(BOILER-PLANT SHUTDOWN))로부터 최종목표상태가 BOILER-PLANT의 SHUTDOWN 완료인 것을 알 수 있다.

2) *FINAL-STATE*에 관계된 플랜트나 장치의 하부장치가 무엇인지 알아낸다.

BOILER-PLANT의 하부장치는 지식 BASE 중에

```
(PUT BOILER-PLANT 'COMPNT '(FUEL-BURNERS)
                    (AUXILIARY-INSTRUMENTS)))
```

FUEL-BURNERS, AUXILIARY-INSTRUMENTS인 것을 알 수 있다.

3) 운전원의 경험지식에 대한 General Rule을 가지고 구체적인 Rule를 생성한다.

1), 2)의 과정을 통해서 얻은 지식을 General Rule에 적용시키면 다음과 같이 표현된다.

```
(IF ((FUEL-BURNERS FIRING-STOP T)
      (AUXILIARY-INSTRUMENTS SHUTDOWN T))
    THEN (BOILER-PLANT SHUTDOWN T))
```

4) 생성된 Rule의 IF부에 표현된 장치의 하부장치가 있는지 확인하고, 있으면 2), 3)의 과정을 되풀이하고 없으면 종료한다. 이러한 과정을 통하여 생성된 Rule은

```
(IF ((FUEL-GAS-BURNERS FIRING-STOP T)
      (FUEL-OIL-BURNERS FIRING-STOP T)
```

THEN (FUEL-BURNERS FIRING-STOP T))
 (IF ((DFD SHUTDOWN T)
 (EP SHUTDOWN T)
 (SAH SHUTDOWN T)
 (AH SHUTDOWN T)
 (BFW-PUMPS SHUTDOWN T)
 (CONTINUOUS-BLOWDOWN SHUTDOWN T)
 (CHEMICAL-FEEDING SHUTDOWN T)
 (SAMPLE-AND-ANALYZERS SHUTDOWN T))
 THEN (AUXILIARY-INSTRUMENTS SHUTDOWN T)) ...

5) 위의 생성된 모든 Rule를 이용하여 Fig. 5(b)와 같은 계층적인 구조를 만들 수 있다. 구체적으로 설명하면 Rule에서 THEN 부의 하위 Level 중간목표는 IF 부가 되므로, 이 때 SUBGOAL이라는 속성변수로서 Rule를 Tree화 할 수 있다. 결과적으로 Fig. 5(b)와 같은 계층 구조로서 나타나게 된다.

6. SUBGOAL의 순서결정을 위한 지식 표현

위에서 살펴본 바와 같이 중간목표들을 계층화할 경우 최종목표에 대한 중간목표들을 생성할 수 있다. 그러나 중간목표들을 아무 순서 없이 달성해 갈 경우 플랜트가 위험 상태에 이르거나 환경에 악영향을 끼칠 수 있으며, 에너지도 효율적으로 사용할 수 없게 된다. 실제로 본 보일러의 플랜트 shutdown의 경우에 순서 없이 중간목표를 달성해 가면 furnace내에 연료가 축적되어 재가동시 폭발하거나, 드럼이 과열되어 파열하는 등의 사고들이 발생하게 된다. 또한 flue gas가 대기 중으로 아무 처리 없이 방출되어 환경을 오염시킬 수도 있다.

그래서 운전원이 경험적인 지식을 사용하여 순서를 적절히 결정해 주어야 한다. 이때 사용되는 지식은 1. 운전 제약조건 2. 환경오염 방지 조건 3. 에너지 효율적인 사용 방법 등이 있다.

다음 Fig. 6은 중간목표의 순서를 결정해 주는 지식의 일부이다.

이 그림에서 (a)는 fuel의 firing이 정상적으로 이루어지고 있는데, 전기집진기(E.P)가 먼저 shutdown되었을 경우 매연이 발생하게 된다는 것을 의미하고 있다. (b)는 fuel의 firing이 정상적으로 이루어지고 있는데, 보일러의 feed water 펌프가

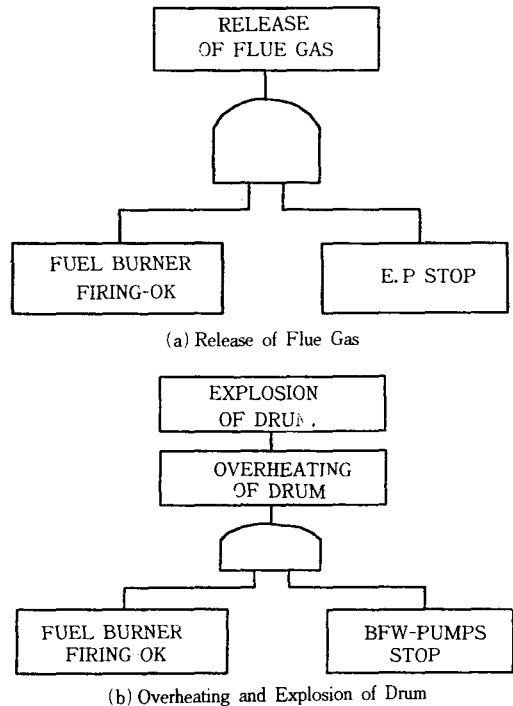


Fig. 6 A part of knowledge base for ordering the subgoals

shutdown되었을 경우 드럼이 과열되어 파열하는 사고가 발생하게 된다는 것을 의미한다. 이러한 사실을 통해서 전기집진기, 보일러의 feed water 펌프보다 fuel의 firing을 먼저 중지시켜야 한다는 것을 알 수 있다. 또 어떤 경우에는 에너지 효율 등을 고려해 볼 때 순서를 바꾸어서는 안되는 경우도 있다. 그래서 주어진 사실로부터 추론하여 중간목표의 순서를 결정해 주기 위해서 Fig. 6의 (a)에 대해서 다음과 같이 Rule로써 지식을 표현하였다.

1) 발생한 상황에 대한 표현

《Rule의 구조는》

(IF ((장치의 종류/운전목표/도달여부) ...)

THEN (EVENT의 종류))이다.

(RULE1 (IF ((FUEL-BURNERS FIRING-STOP NIL)

(EP SHUTDOWN T))

THEN (RELEASE-OF-FLUE-GAS)))

이 표현의 의미는 다음과 같다.

(규칙1 (만일 ((연료버너의 Firing이 중지되지 않았고)

(전기집진기가 중지되었다))

그러면 (매연이 방출된다)))

2) 상황의 평가에 대한 표현

《Rule의 구조는》

(IF (EVENT의 종류)

THEN (EVENT의 안전상, 에너지 효율상, 환경상의 평가))이다.

(RULE4 (IF (RELEASE OF FLUE GAS)

THEN (ENVIRONMENTAL POLLUTION)))

이 표현의 의미는 다음과 같다

(규칙4 (만일 (매연 방출이면)

그것은 (환경오염이다)))

3) 순서 결정에 대한 표현

《Rule의 구조는》

(규칙 (IF (상황의 평가에 대한 결과)

THEN (상황에 따른 중간목표의 순서)))이다.

(RULE7 (IF (ENVIRONMENTAL POLLUTION)

THEN (CHANGE THE SEQUENCE OF SUBGOALS)))

이 표현의 의미는 다음과 같다.

(규칙7 (만일 (환경 오염이 발생한다면)

그러면 (중간목표의 순서를 바꾸어야 한다)))

중간목표의 순서를 결정해 주는 지식을 모두 정리하여 rule로 표현할 수 있는데, 이렇게 되면 Rule Matching과 Forward Chaining방법에 의해 각 중간목표들의 순서를 추론할 경우 전체 중간목표들의 순서를 결정해 줄 수 있게 된다.

7. SUBGOAL 달성을 위한 조작기구의 선택법

중간목표의 순서가 결정되었으면, 각 중간목표를 달성하기 위한 기본 조작기구들을 찾아야 한다. 여기서는 Fig. 7과 같은 방법으로 최말단 조작기구를 찾게 된다. 그림과 같이 'fuel gas의 #1 버

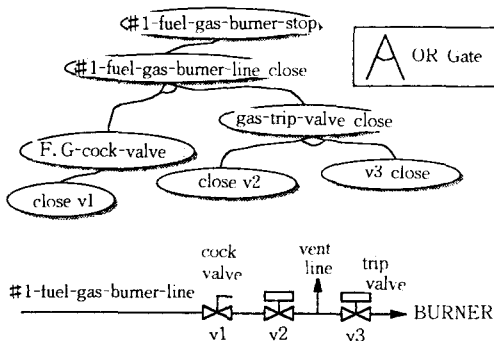


Fig. 7 Searching for positive operation devices

너를 중지'라는 중간목표가 있으면, 2장의 의미네트워크와 Frame에 의해 표현된 대상공정지식으로부터 직접적인(positive) 관계가 있는 line 및 조작기구들을 찾아간다. 즉, Fuel Gas의 #1 버너의 Firing을 중지하려면 먼저 #1 버너 Line를 Close하면 된다. 또, #1 버너 Line을 Close하려면, #1 버너 Line상에 있는 Cock 밸브나 Trip 밸브를 잠그면 된다. 결과적으로 'fuel gas의 #1 버너를 중지'라는 중간목표에 대한 조작후보는 Cock 밸브인 v1과 Trip 밸브인 v2, v3이 된다.

중간목표와 직접적인 관계가 있는 Line 및 조작기구를 Topology로부터 찾아 positive나 component라는 속성변수로서 다음과 같이 표현하면 Fig. 7과 같은 탐색 트리를 만들 수 있다.

```
(not-fuel-gas-burner-firing-stop 'positive not-fuel-gas-burner-line-close)
(not-fuel-gas-burner-line-close 'positive (or (#1-fuel-gas-cock-valve close)
                                                #1-fuel-gas-trip-valve close))
(not-fuel-gas-cock-valve 'component 'v1)
(not-fuel-gas-trip-valve 'component 'v2 v3)
```

그리고 이러한 탐색 트리를 다음과 같이 Rule로 표현할 경우 Backward-chaining하여 각 중간목표를 달성하기 위한 기본 조작기구들을 찾아낼 수 있다.

```
(IF (not-fuel-gas-burner-line-close)
THEN (not-fuel-gas-burner-firing-stop))
(IF (not-fuel-gas-cock-valve-close)
THEN (not-fuel-gas-burner-line-close))
(IF (not-fuel-gas-trip-valve-close)
THEN (not-fuel-gas-burner-line-close))
```

8. 제약조건 및 조작의 구체화를 위한 지식표현

중간목표에 대한 조작후보가 찾아졌으면, 그 탐색된 기본 조작기구-밸브, controller, switch-에 대한 제약조건을 생성함으로써 제약조건을 범하지 않고 목적상태에 이를 수 있는 조작들을 찾을 수 있다. 탐색된 조작기구에는 조작전 제약조건 (Pre-constraint), 조작중 제약조건 (Op-constraint), 조작후 제약조건 (Post-constraint)이 있다. 어떤 조작기구(Op-1)에 대해서 다음과 같이 제약조건을 표현할 수 있다.

(Op-1
 (name fuel-gas-cock-valve)
 (initial-stem-position 0.5)
 (function model-1)

 (Constraints (Pre-Constraint (FG-burner-pressure check))
 (Op-Constraint (close-speed check))
 (Post-Constraint (FG-burner-pressure check))))

만일 조작후보로서 조작기구 Op-1이 선택되었다면, 조작절차 합성기에서 Op-1의 제약조건을 확인한다. 확인한 결과를 보면, 조작기구 Op-1에 대한 제약조건으로는 위의 표현에서 보는 바와 같이 Pre-Constraint로 fuel gas 버너의 압력을 체크하라는 제약조건이 있고, Op-Constraint로 close 속도를 체크하라는 제약조건이 있으며, Post-Constraint로 fuel gas의 버너 압력을 체크하라는 제약조건이 있다. 여기서 Pre-Constraint인 fuel gas의 압력을 체크하라는 제약조건에 대해서 살펴보면 Fig. 8과 같다.

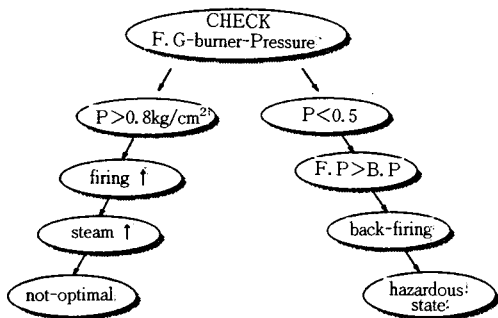


Fig. 8 Schematic diagram of constraints formulation

즉, fuel gas 버너의 압력이 상위 한계점인 0.8Kg/m²를 초과하면 shutdown중의 기준치보다 fuel gas의 firing이 강해지게 된다. firing이 강해지면 shutdown 과정에서 요구하는 만큼 steam의 발생량이 감소되지 않게 될 뿐 아니라 압력이 그 이상으로 계속 증가할 경우 배관에 파압이 걸려 무리가 가게 된다. 그래서 버너의 압력을 0.8kg/m²이하로 유지해야 한다. 그런데 만일 fuel gas의 버너 압력이 0.5kg/m²이하가 되면 버너의 압력이 furnace의 압력보다 낮아져 화염이 furnace로 firing되지 않고, 오히려 연료가스 파이프 쪽으로 역류하는 사고가 발생할 수 있다. 그러므로 버너 압력이 0.5kg/m²이상 되어야 한다. 결국, 이 두 가지 사실

을 종합하면, 버너의 압력을 0.5~0.8kg/m²로 유지하라는 제약조건을 생성하게 된다. 이 제약조건이 생성되면 조작전에 fuel gas의 버너 압력을 제약조건대로 유지하도록 한다. 그런데 이 버너의 압력을 유지하기 위해서 조작후보 Tree에 의해 조작기구로서 fuel gas의 flow controller가 선택되게 된다. 이 controller를 조작하기 위해서도 역시 제약조건을 동일한 방법으로 생성해야 한다.

위에서 살펴본 상황의 전개 과정 및 인과관계를 다음과 같이 IF.. THEN.. rule로써 표현하였다.

(Constraint-Formulation-Rules
 (If (> fuel-gas-burner-pressure fuel-gas-burner-pressure-high-limitation)
 Then (fuel-gas-burner-firing increase))
 (If (fuel-gas-burner-firing increase)
 Then (can not decrease flow-rate of steam))
 (If (can not decrease flow-rate of steam)
 Then (can not shutdown boiler plant))
 (If (< fuel-gas-burner-pressure furnace-pressure)
 Then (flowing backward of flame))
 (If (flowing backward of flame)
 Then (hazardous state))
)

이렇게 상황의 전개과정을 rule로 표현할 경우 rule matching과 forward chaining 방법으로 각 상황에 대한 인과관계로써 제약조건을 생성할 수 있다. 후보조작으로 탐색된 조작기구에 대한 제약조건이 생성되면, 이 제약조건에 의해 조작기구의 조작속도 및 조작시간이 결정된다.

조작이 합성되는 과정을 보면 Fig. 9와 같은 흐름도로 나타낼 수 있다.

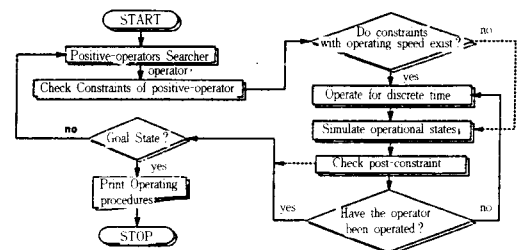


Fig. 9 Flowchart for the synthesis of operating procedures

여기서 조작속도에 대한 제약조건이 있을 경우 조작하는 중에 위험성을 체크하기 위해서 해당 조작기구마다 discrete operating time을 두어 단계적

으로 조작하면서 각 단계마다 상태변화를 체크함으로써 제약조건을 범하지 않는가 확인한다. 결과적으로 모든 중간목표에 대한 조작후보를 탐색하고, 제약조건을 생성하여, 제약조건에 부합하는 적절한 조작들을 실행하면 최종목표상태에 이르게 된다.

9. 결 론

본 연구에서는 보일러 플랜트를 정상적으로 운전되고 있는 상태에서 shutdown할 경우 운전원의 오조작, 오판단으로 인한 사고를 막기 위한 운전 지원 시스템 및 자동 Shutdown 시스템의 구축에 필요한 지식들을 표현하는 방법에 대해서 논의하였다.

운전원이 보일러 플랜트를 Shutdown할 때 사용하는 대상공정에 대한 지식과 경험적인 운전 지식을 여러 가지 표현방법을 이용하여 적절하게 표현하였다. 구체적으로 말해보면 대상공정에 대한 지식을 의미 네트워크와 Frame을 가지고 표현하였으며, 운전상태를 여러 가지 상태 속성변수로서 표현하였다. 또한 조작기구의 실행에 의한 공정의 상태변화를 모사하기 위해 기능수행 Rule과 상태변수 추산 모델이라는 함수로서 표현하였다. 마지막으로 운전원의 경험적인 운전지식은 계층적 모델 및 Rule-based 모델과 속성변수로서 표현하였다. 이러한 지식표현은 운전원이 플랜트의 Shutdown시 진행되는 추론 과정을 searching, rule matching, forward chaining, backward-chaining과 같은 인공지능 방법으로 대체시킬 수 있도록 하였다. 그래서 컴퓨터가 운전원과 같이 중간목표들을 생성하고, 각 중간목표를 달성하기 위한 기본 조작기구들을 찾도록 하였으며, 또한 탐색된 조작기구들에 대한 제약조건을 생성하여 제약조건을 범하지 않고 보일러 플랜트를 Shutdown시키도록 토대를 마련하였다.

본 연구는 한국과학재단지정 우수연구센터인 공정산업의 능동자동화 연구센터와 에너지자원 기술개발 지원센터의 연구비 지원으로 이루어졌으며, 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) J. Calandranis, G. Stephanopoulos, S. Nunokawa Diad-kit/BOILER : On-line Performance Monitoring and Diagnosis. Chem. Engng. Progress, January, pp. 60~68, 1990.
- 2) Rivas J. R & D. F. Rudd, Synthesis of Fail-Safe Operations. AIChE Journal, Vol. 20, pp. 311~319, 1974.
- 3) O'Shima E., Safety Supervision of Valve Sequences. Journal Chem. Engng Japan, Vol. 11, pp. 390~395, 1978.
- 4) Fusillo R. H. & G. J. Powers, A Synthesis Method for Chemical Plant Operating Procedures. Comput. Chem. Engng, Vol. 11, pp. 369~382, 1987a.
- 5) Fusillo R. H. & G. J. Powers, Computer-Aided Planning of Purge Operations. AIChE Journal, Vol. 34, pp. 558~566, 1988.
- 6) Tomita S., K.S. Hwang, O'Shima E., McGreavy C., Automatic Synthesizer of Operating Procedures for Chemical Plant by use of Fragmentary Knowledge. Journal Chem. Engng Japan, Vol. 22, pp. 364~372, 1988.
- 7) R. Lakshmanan & G. Stephanopoulos, Synthesis of Operating Procedures for Complete Chemical Plants-I. Hierarchical, Structured Modelling for Nonlinear Planning. Comput. Chem. Engng, Vol. 12, pp. 985~1002, 1988.
- 8) R. Lakshmanan & G. Stephanopoulos, Synthesis of Operating Procedures for Complete Chemical Plants-II. A Nonlinear Planning Methodology. Comput. Chem. Engng, Vol. 12, pp. 1003~1021, 1988.
- 9) Bo-Kyeng Hou, Dea-Myung An, Kyu-Suk Hwang, A Study on the Knowledge Representation for the Recognition of Hazardous Conditions in Boiler Plant. Journal of KIIS Vol. 10, December, pp. 60~67, 1995.