

소각공정 이상연소 진단 및 지능제어 시스템 기술

조 욱 상
수원대 환경공학과



1. On-line 전문가시스템 과 공정제어기술

화학 공정 및 플랜트의 운전 조업에 있어서 공정상의 이상 유무를 진단하고 문제 발생시 이에 적절한 조치를 취할 수 있도록 현장 조업자를 지원하기 위한 목적의 전문가 시스템에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다. 조업 지원 및 공정 제어용 전문가 시스템은 인공지능 기술의 발달과 함께 지식 기반 전문가 시스템에 의한 공정 공학(process engineering) 상의 여러 가지 난제를 해결하고자 하는데 초점을 두게 되는데 현장의 조업자를 포함한 실무 엔지니어들의 공정 조업 관련 지식을 지식베이스 화하여 논리적이고 체계적인 추론 규칙(Inference rules)을 적용시켜 지속적이고 신속, 정확한 결론을 내려 줌으로써 안정적인 조업을 지원할 수 있으며 또한 표준화된 기술 및 조업 정보를 관리할 수 있는 기능을 제공하기 때문에 공정 조업에 있어서 매우 유익한 시스템 도구로 활용되고 있다(Fig.1-2). 특히 화학 공정에서의 컴퓨터 제어기술과 분산 제어 시스템기술의 발달은 전문가 시스템의 응용을 위한 좋은 여건을 제공해 주고 있다. 공정 전체 운영의 최적화를 위한 기술은 구조적으로 몇 개의 계층으로 구성되는데 직접적인 제어 기능이 실현되는 초하부 계층과 이로부터 받아들이는 각종 공정 정보를 바탕으로 공정의 감시 및 제어, 진단을 해주는 계층, 최적화 및 전략 기능이 수행되는 최상위 계층으로 구성되어 있다고 볼 수 있다. 따라서 각 계층에서의 전문가와 조업 운전자의 경험과 이론을 이용하여 최적의 조업을 수행하고자 하는 것이 화학 공정에서의 전문가 시스템 적용 목적이라고 할 수 있다. 이를 위해서 공정제어, 공정 감시 및 진단, 최적화, 공정계획수립(planning and scheduling) 등의 각 계층에 대한 전문가 시스템의 개별적 응용이 연구되고 있으며 궁극적으로는 보다 종합적 개념의 시스템(Fig.3)으로 발전되어 가고 있는 추세에 있다. 소각로, 폐수 처리 공정 등 환경 플랜트에서의 조업 진단 및 제어 목적용 On-line 전문가 시스템(Fig.4)의 국내외적인 개발 위치는 출발점 상에 있다고 볼 수 있다. 최

근 일본의 JGC社 에서는 일반 폐기물 소각로의 연소 제어 시스템에 전문가 시스템을 적용하여 기존의 PID연소 제어의 단점을 보완하고 장시간 안정적인 연소가 유지될 수 있도록 개발하였다고 하지만 실용화 여부는 아직 미지수이다. 외국의 사례를 보게 되면 대부분 1990년대 초반부터 연구 개발을 시작하고 있는 실정이므로 일단 시기적으로 볼 때 본 연구 개발이 늦은감은 아니라 할 수 있다. 또한 기술적으로 볼 때도 수 초 단위의 응답시간(response time) 심지어 밀리 초 단위의 순간 제어를 필요로 하는 대단위 석유화학 및 정밀 화학 공정의 제어 특성과는 달리 폐기물 소각 공정의 연소 제어는 분 단위 이상의 제어 시간을 갖는 특성을 갖기 때문에 상대적으로 기술적용이 용이하다고 할 수 있다. 문제는 전문가 시스템을 구성하고 있는 지식베이스를 얼마나 유익한 지식 정보(경험 및 이론)로 채울 수 있는냐는 점이며 특히 연소공정의 제어 변수와 영향 인자들 간에 통계 제어 모델에 의한 상관관계를 잘 찾아내어 신뢰도가 높은 추론 규칙(Inference rules) 과 실행 규칙(Production rules) 으로 구성할 수 있는냐는 점이다. 이런 점들을 고찰해 볼 때 産·學이 협조 체계를 잘 이루어 원활한 연구 수행이 이루어 질 수 있으면 On-line 전문가 시스템을 적용한 공정제어 시스템의 실용화가 충분히 가능할 수 있으리라 전망되며 이러한 지능제어시스템을 적용 시 기대되는 경제적 효과와 국내 외적으로 활발한 연구 추세로 보아 핵심 공정 기술의 한 분야가 될 것임이 분명하다.

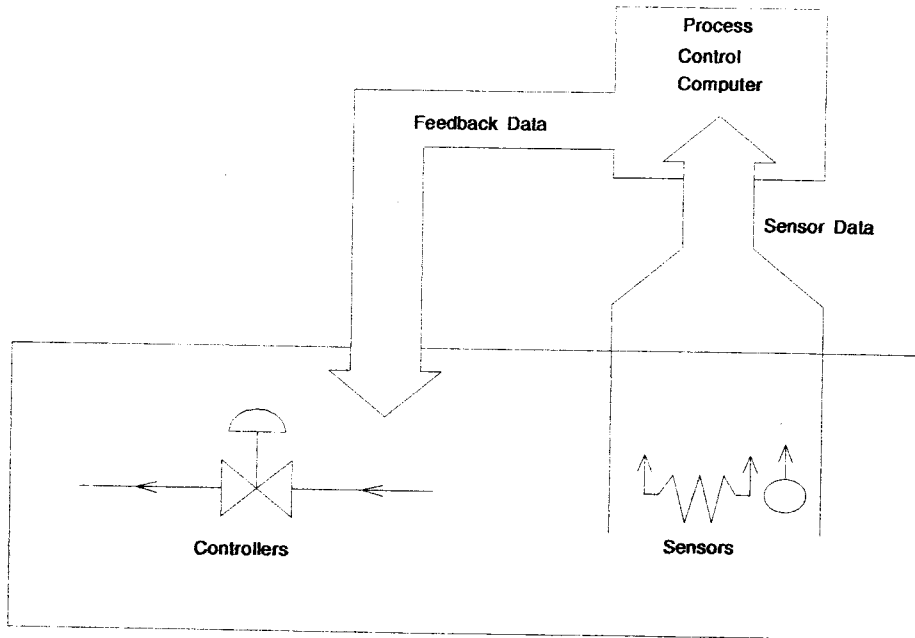


Figure 1. A conventional process control system

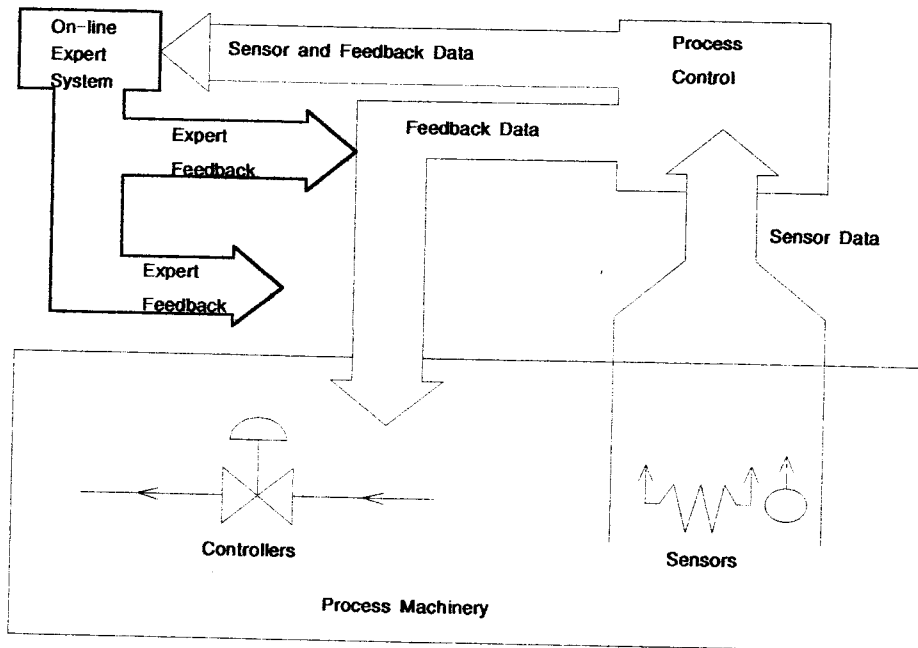


Figure 2. A process control system integrated with on-line expert system

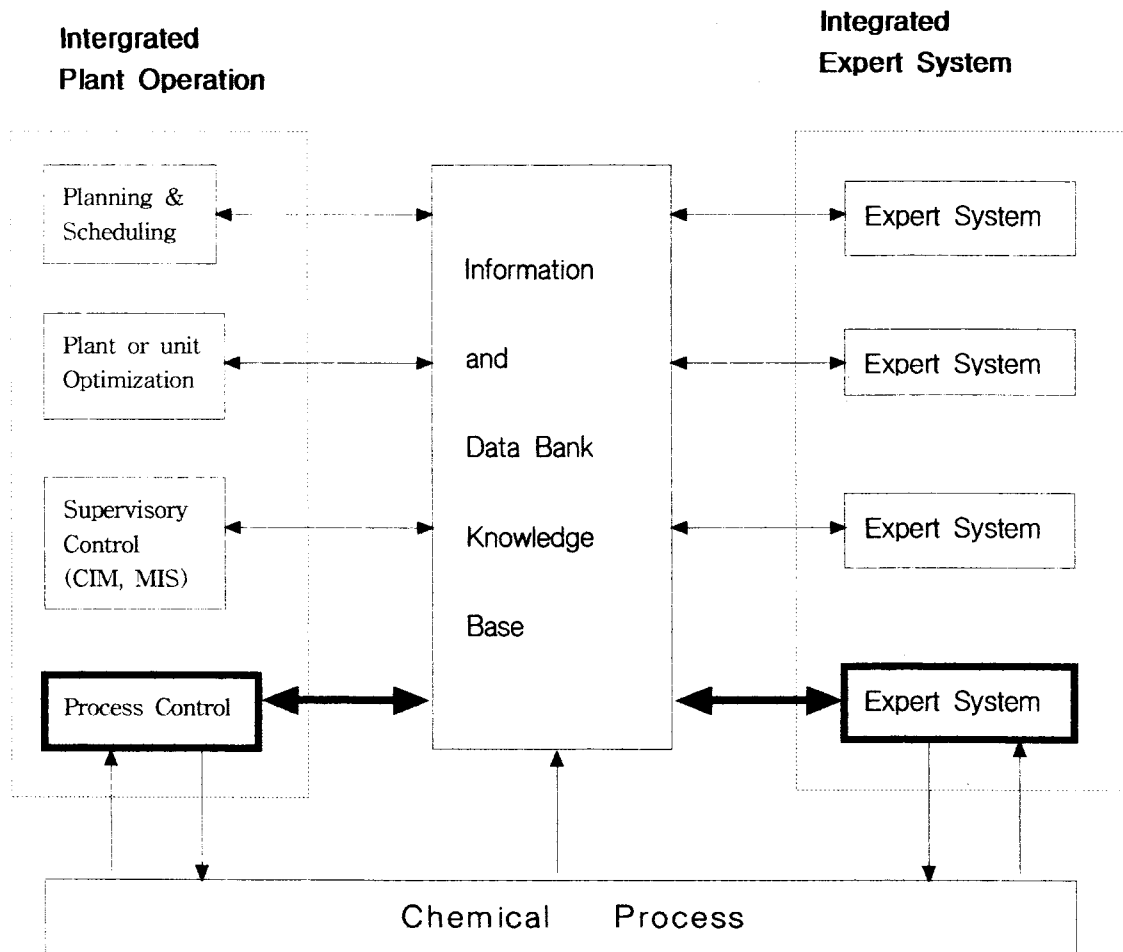


Fig.3. 공정제어 기술의 계층적 구조와 전문가 시스템

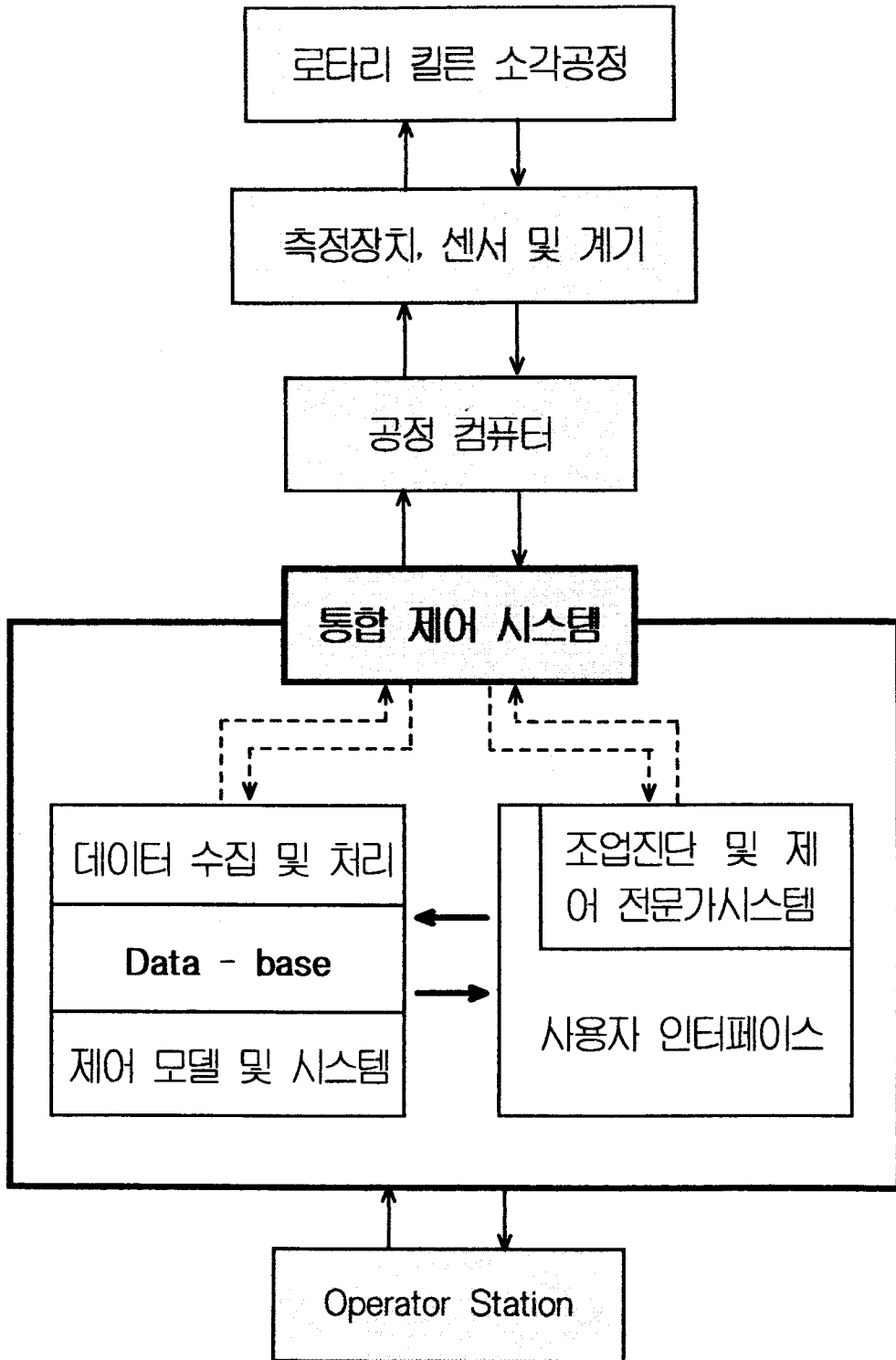
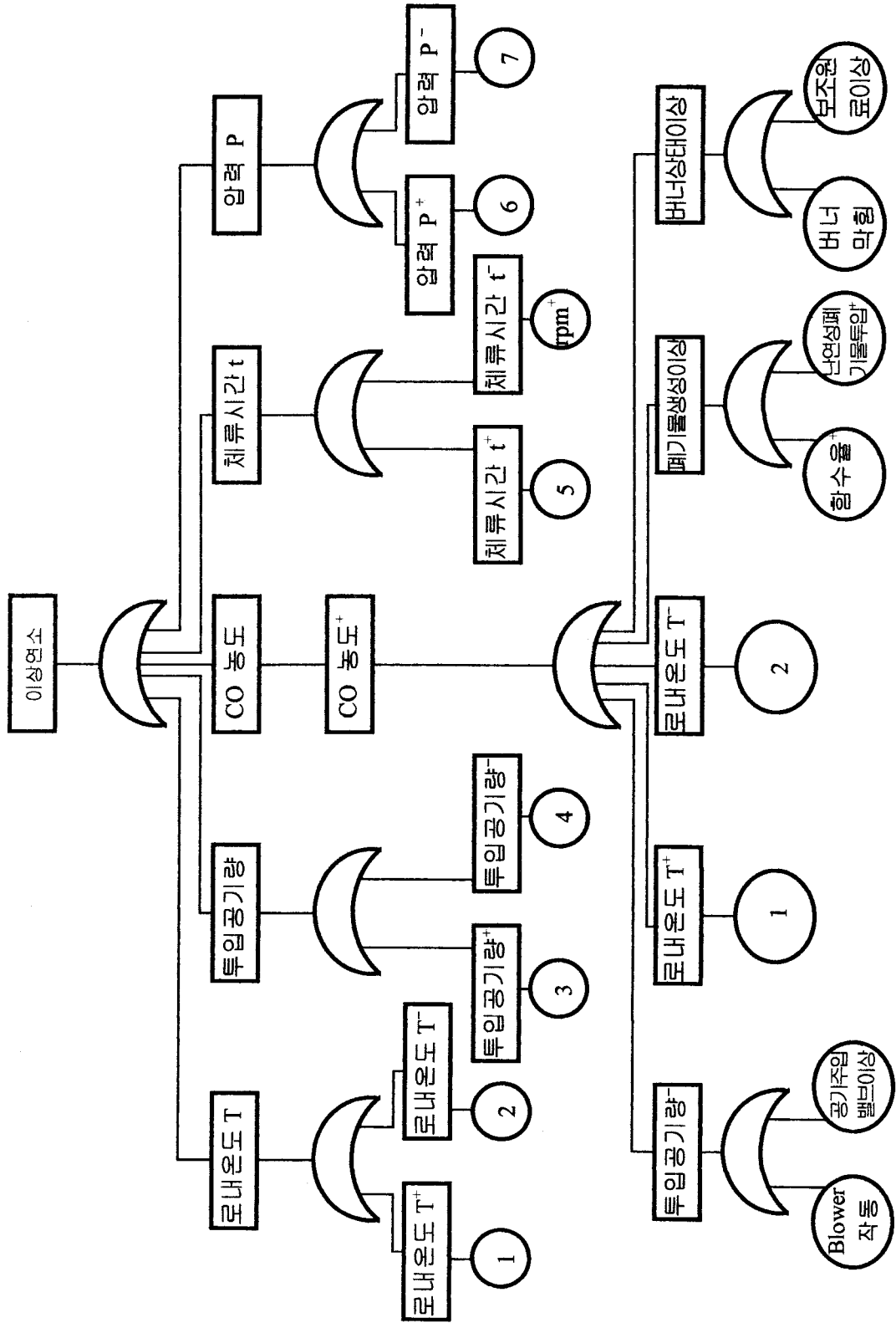
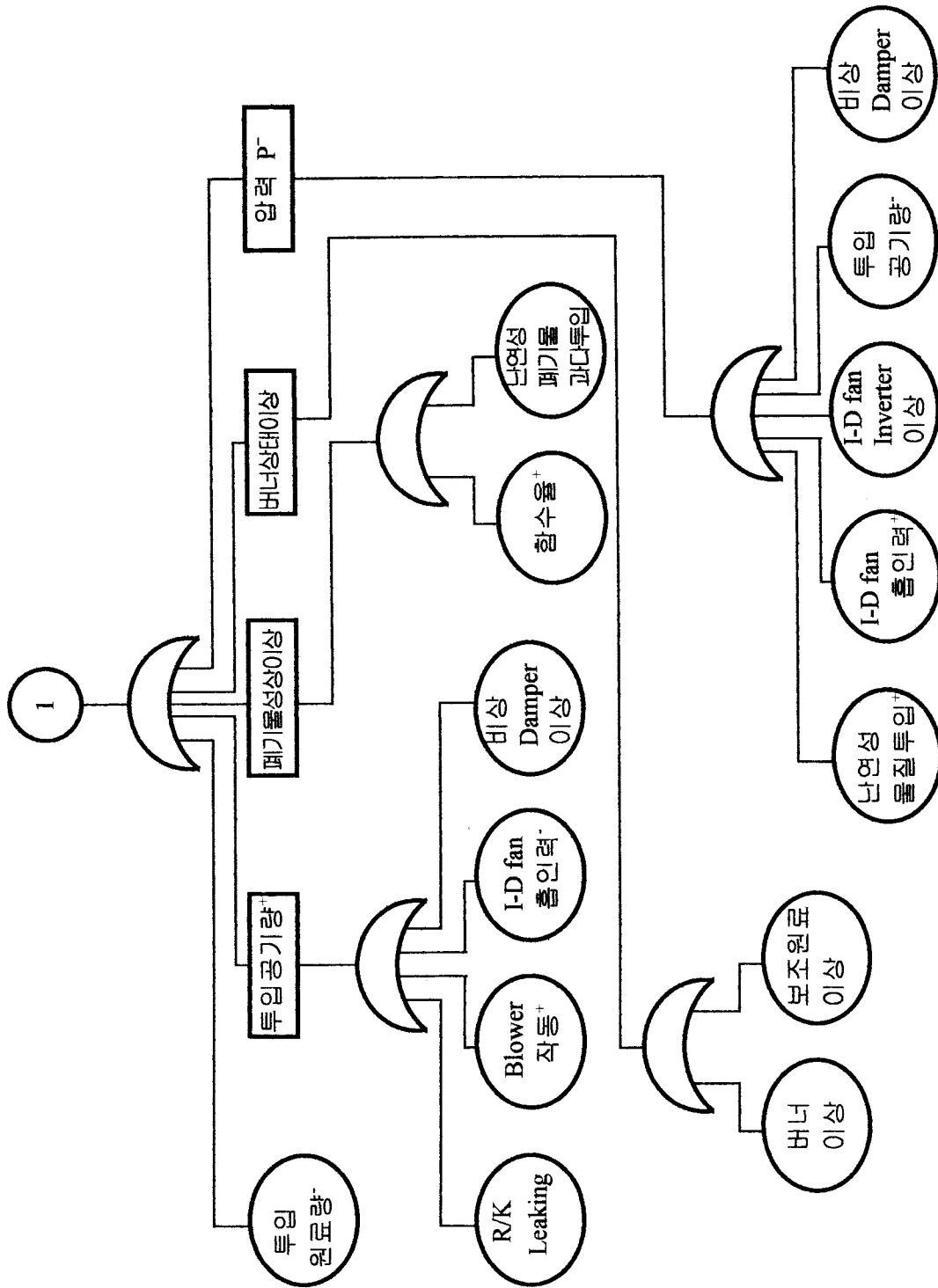


Fig.4. On-line 전문가시스템 구성체계도

2. 소각공정 이상진단 방법 및 구현



Symptom Tree Model



Symptom Sub-tree Model

3. 이상진단 전문가시스템 (Off-line)

1) 추론규칙 (Inference Rules)

RULE NUMBER: 251

IF:

- 측정된 로내의 온도는 몇도입니까? 900도 이상
- and 측정된 로내의 압력값은 얼마입니까? -7 - -3mmH2O 사이
- and 측정된 로내의 온도는 몇도입니까? 800도 이하
- and 상부기준시 1차연소실의 연소공기 투입 분배율은 얼마입니까?
55-65% 사이
- and R/K의 RPM은 얼마입니까? 0.3rpm 이하

THEN:

- 1차연소실의 공기비를 0.65-0.75 범위로 조절한다.
- Confidence=8/10
- and 2차 연소실의 공기비를 1.35-1.45 범위로 조절한다.
- Confidence=8/10
- and RPM이 지나치게 낮은 경우에는 고온의 연소가스와 폐기물총과의
교반이 적어 폐기물 표면에서의 연소가 지배적이어서 CO와 같은
불완전 연소 생성물이 다량 배출된다. 그러므로 RPM 범위를 0.3-0.5
범위로 조절한다. - Confidence=7/10
- and 폐기물 성상의 이상유무(가연성 폐기물)를 확인한다.
- Confidence=7/10
- and Burner의 출력을 낮춘다. - Confidence=7/10
- and Blower의 회전수를 높여서 공기주입량을 증가시킨다.
- Confidence=6/10
- and 폐기물 투입량의 이상유무를 확인한다. - Confidence=6/10
- and 과소 연소공기량 투입시 공기량을 늘린다. - Confidence=6/10

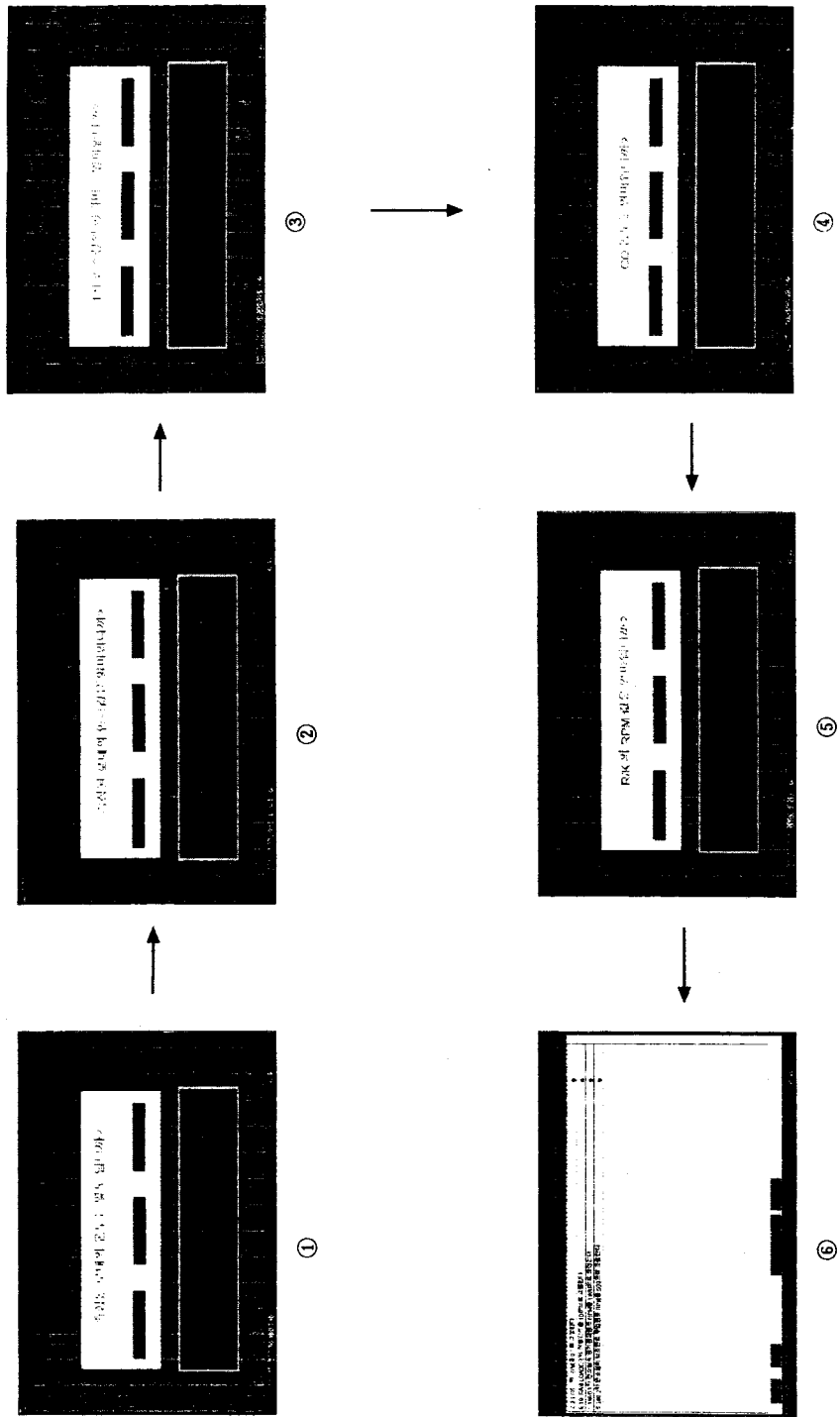
2) 지식베이스 (Knowledge-Base)

```

Q11-Q21-Q31-Q41 >>> C35:10 C61:10 C15:9 C17:9 C16:8 C35:8
Q12-Q51 >>> C36:10 C7:8
  Q5:2-Q61 >>>> C37:10 C22:9
    Q6:2-Q71 >>>> C38:10 C14:9
      Q7:2-Q81-Q91-Q17:1 >>>> C40:10 C20:8 C21:7
        Q17:2 >>>> C13:10 C10:10
          Q9:2-Q40:1 >>>> C8:9 C15:9 C62:9 C63:6
            Q10:2-Q41:1 >>>> C65:10 C64:7 C66:7
              Q41:2-Q42:1 >>>> C67:10 C68:9 C69:9 C70:9
                Q42:2-Q43:1 >>>> C72:10 C71:9 C73:8
                  Q43:2-Q12:1-Q44:1-Q45:1 >>>> C75:9
                    Q45:2-Q46:1 >>>> C80:8 C81:8 C78:7 C79:7 C15:5 C82:4
                      Q46:2 >>>> C77:9 C7:7 C15:7 C78:7 C79:7
                        Q44:2 >>>> C74:9 C75:9
                          Q12:2-Q47:1 >>>> C83:9 C84:9 C85:4 C86:4 C87:4
                            Q47:2-Q48:1-Q49:1 >>>> C61:10 C28:8 C88:8 C89:8 C90:5
                              Q49:2 >>>> C91:9 C92:7
                                Q48:2-Q50:1 >>>> C7:10 C93:9 C94:9 C95:7
                                  Q50:2-Q51:1 >>>> C96:8 C97:7 C98:7
                                    Q51:2-Q31:1 >>>> C71:9 C99:9
                                      Q31:2 >>>> C101:9 C102:9 C103:8 C104:7
                                Q8:2 >>>> C18:10 C39:10
                              Q3:2-Q11:1-Q12:1-Q13:1 >>>> C45:10 C1:9 C2:8 C5:7 C3:6 C6:6 C4:5
                                Q13:2-Q14:1 >>>> C44:10 C7:9 C8:8 C9:7
                                  Q14:2 >>>> C44:10 C7:9 C8:9 C9:8 C10:4
                                    Q12:2-Q15:1-Q14:1 >>>> C44:10 C7:9 C9:8 C8:7
                                      Q14:2-Q13:1 >>>> C45:10 C6:9 C1:8 C4:8 C2:7 C5:7 C3:6
                                        Q13:2-Q50:1 >>>> C7:9 C93:8 C94:8
                                          Q50:2-Q51:1 >>>> C96:8 C97:6 C98:6
                                            Q51:2-Q31:1 >>>> C71:9 C99:8
                                              Q31:2 >>>> C94:9 C9:8 C106:8 C105:5
                                                Q15:2-Q47:1 >>>> C44:10 C83:9 C84:9 C85:4 C86:4 C87:4
                                                  Q47:2-Q48:1-Q49:1 >>>> C61:10 C28:8 C88:8 C89:6 C90:5
                                                    Q49:2 >>>> C91:9 C92:6
                                                      Q48:2-Q50:1 >>>> C7:9 C93:8 C94:8 C95:6
                                                        Q50:2-Q51:1 >>>> C96:8 C97:6 C98:6
                                                          Q51:2-Q31:1 >>>> C71:9 C99:8
                                                            Q31:2 >>>> C101:10 C102:9 C103:8 C104:7
                                                    Q11:2-Q19:1-Q20:1 >>>> C46:10 C31:8 C32:8 C8:7
                                                      Q20:2-Q21:1 >>>> C47:10 C33:9
                                                        Q21:2-Q22:1 >>>> C48:10 C30:8
                                                          Q22:2-Q52:1 >>>> C107:9 C108:8 C94:7 C105:7 C106:7
                                                            Q52:2-Q63:1 >>>> C94:9 C105:8 C106:8
                                                              Q53:2 >>>> C3:8 C108:8 C109:8 C110:8 C111:8 C112:8 C113:8
                                                                Q19:2-Q23:1-Q24:1-Q25:1 >>>> C51:10 C27:7 C28:6
                                                                  Q25:2-Q59:1 >>>> C108:9 C28:8 C101:8 C3:7 C7:7 C8:7 C14:7 C113:6
                                                                    Q59:2-Q60:1 >>>> C7:8 C8:8 C23:7 C119:7
                                                                      Q60:2-Q61:1 >>>> C7:8 C34:8 C3:7 C102:7 C119:6
                                                                        Q61:2 >>>> C109:8 C111:7 C112:7 C3:6 C113:6
                                                                          Q24:2 >>>> C50:10 C29:8
                                                                            Q23:2-Q54:1 >>>> C108:8 C110:8 C112:8
                                                                              Q54:2-Q55:1 >>>> C6:9 C7:9
                                                                                Q55:2-Q56:1 >>>> C9:9 C11:9 C114:5
                                                                                  Q56:2-Q57:1 >>>> C8:9 C15:9 C115:9 C17:6 C25:6
                                                                                    Q57:2-Q58:1 >>>> C8:9 C108:9 C112:9 C116:7 C117:7 C118:7 C113:5 C82:3
                                                                                      Q58:2 >>>> C3:8 C108:8 C109:8 C111:8 C113:8 C110:4
                                                                                        Q2:2-Q23:1-Q30:1-Q36:1 >>>> C9:9 C13:8 C101:7 C113:6
                                                                                          Q36:2-Q48:1 >>>> C9:9 C13:9 C111:8 C99:6
                                                                                            Q48:2 >>>> C2:9 C71:8 C74:7 C102:5
                                                                                              Q30:2-Q24:1 >>>> C50:10 C29:6
                                                                                                Q24:2-Q25:1 >>>> C51:10 C27:8 C28:7
                                                                                                  Q25:2-Q78:1 >>>> C112:9 C2:7 C132:7 C15:6
                                                                                                      Q78:2-Q48:1 >>>> C130:9 C131:8 C132:4
                                                                                                          Q48:2-Q79:1 >>>> C7:9 C10:9 C106:7 C109:6 C120:6
                                                                                                              Q79:2-Q80:1 >>>> C88:9 C132:7 C76:4
                                                                                                                  Q80:2-Q41 >>>> C7:9 C15:9 C9:8 C16:6 C25:4
                                                                                                                      Q42 >>>> C2:8 C108:8 C102:7 C3:6 C112:6 C113:5
                                                                                                                          Q23:2-Q31:1-Q32:1-Q33:1 >>>> C56:10 C11:8
                                                                                                                              Q33:2-Q34:1 >>>> C35:10 C10:8

```

3) 화면구성



4. 소각공정 이상진단 및 On-line 지능제어시스템

1) QUESTIONS:

1 측정된 로내의 온도는 몇도입니까?

800도 이하
800-900도 사이
900도 이상

Name: 로내의 온도
Maximum acceptable = 1

2 측정된 로내의 압력값은 얼마입니까?

-7mmH2O 이하
-7 - -3mmH2O 사이
-3mmH2O 이상

Name: 로내의 압력
Maximum acceptable = 1

3 1차연소실의 공기비는 얼마입니까?

0.65 이하
0.65-0.75 사이
0.75 이상

Name: 1차연소실 공기비
Maximum acceptable = 1

4 CO농도는 얼마입니까?

0 -25 ppm
26 - 35 ppm
35 ppm 이상

Name: CO 농도
Maximum acceptable = 1

.
.
.

2) CHOICES:

- 1 1 1000 1차 연소실 공기공급펌프 RPM을 1000으로 조정한다.
- 2 2 0.3 R/K의 RPM을 0.3으로 조정한다.
- 3 3 650 1차 연소실의 보조연료 투입펌프 RPM을 650으로 조정한다.
- 4 4 1500 2차 연소실의 공기공급펌프 RPM을 1500으로 조정한다.
- 5 5 500 2차 연소실의 보조연료 투입펌프 RPM을 500으로 조정한다.
- 6 6 10 RAM LOADER의 작동간격을 10분으로 조절한다.
- 7 1 600 1차 연소실의 공기공급펌프 RPM을 600으로 조정한다.
- 8 7 5 냉각수 보충 모터를 5 분간 작동시킨다.
- 9 3 0 1차 연소실의 보조연료 투입펌프 RPM을 0으로 조정한다.
- 10 2 0.1 R/K의 RPM을 0.1로 조정한다.
- 11 5 700 2차 연소실의 보조연료 투입펌프 RPM을 700으로 조정한다.

·
·
·
·

3) RULES:

RULE NUMBER: 135

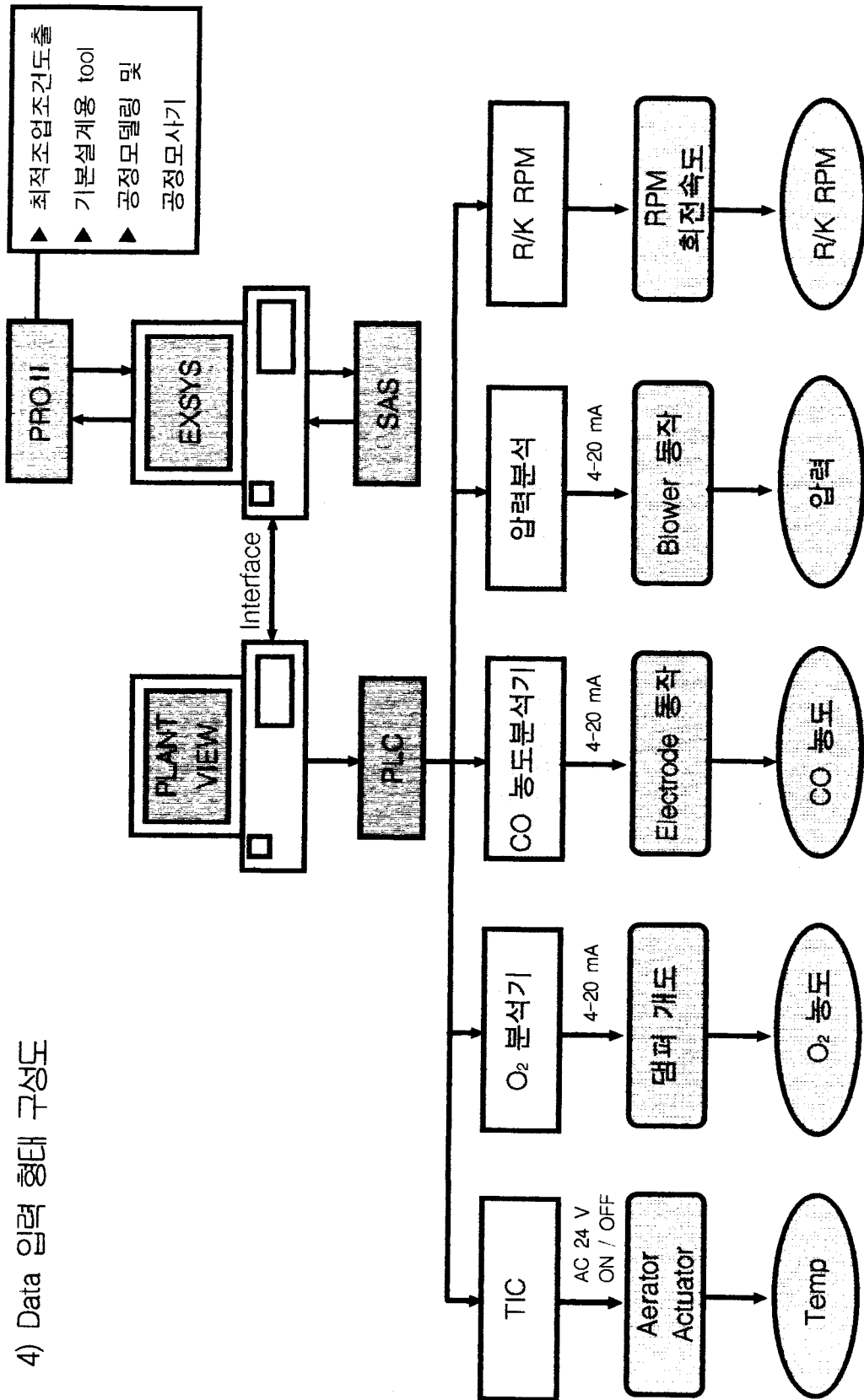
IF:

- 측정된 로내의 온도는 몇도입니까? 800-900도 사이
- and 측정된 로내의 압력값은 얼마입니까? -7mmH2O 이하
- and 1차연소실의 공기비는 얼마입니까? 0.65-0.75 사이
- and CO 농도는 얼마입니까? 35 ppm 이상
- and R/K의 RPM은 얼마입니까? 0.3-0.5rpm 사이

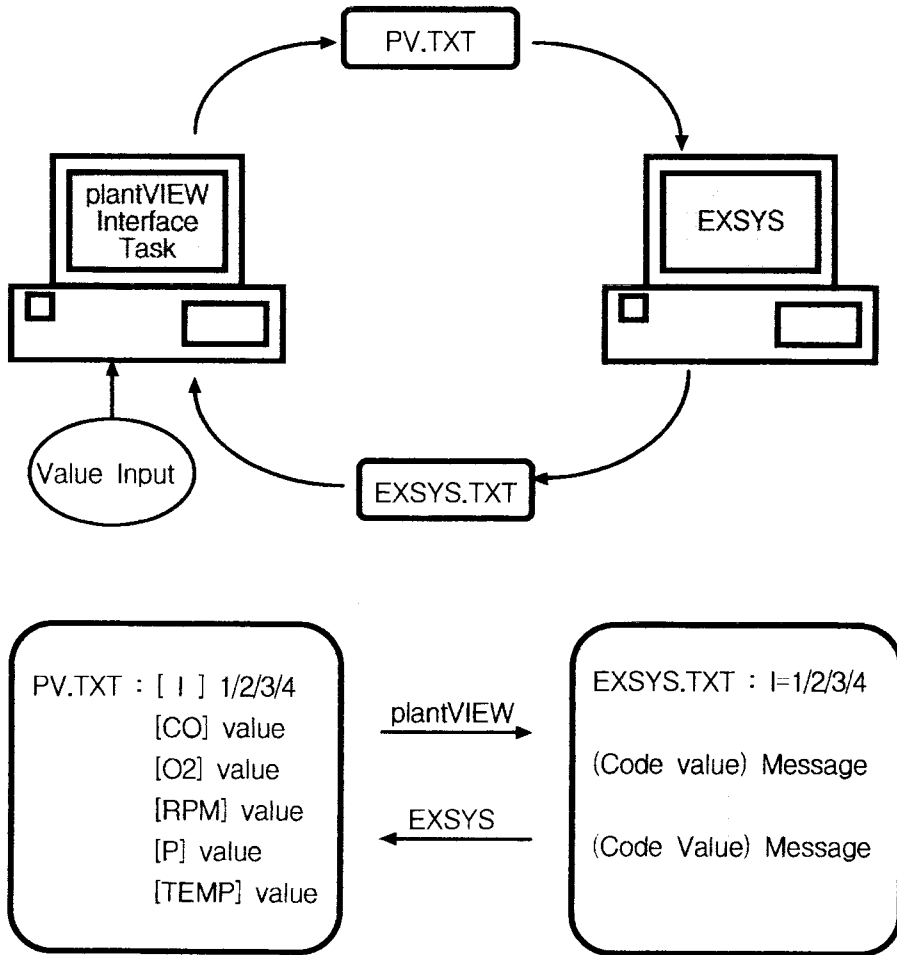
THEN:

- 2 0.1 R/K의 RPM을 0.1로 조정한다. - Confidence=9/10
- and 6 10 RAM LOADER의 작동간격을 10분으로 조절한다.
- Confidence=9/10
- and 1 1000 1차 연소실 공기공급펌프 RPM을 1000으로 조정한다.
- Confidence=9/10
- and 5 500 2차 연소실의 보조연료 투입펌프 RPM을 500으로 조정
한다. - Confidence=9/10

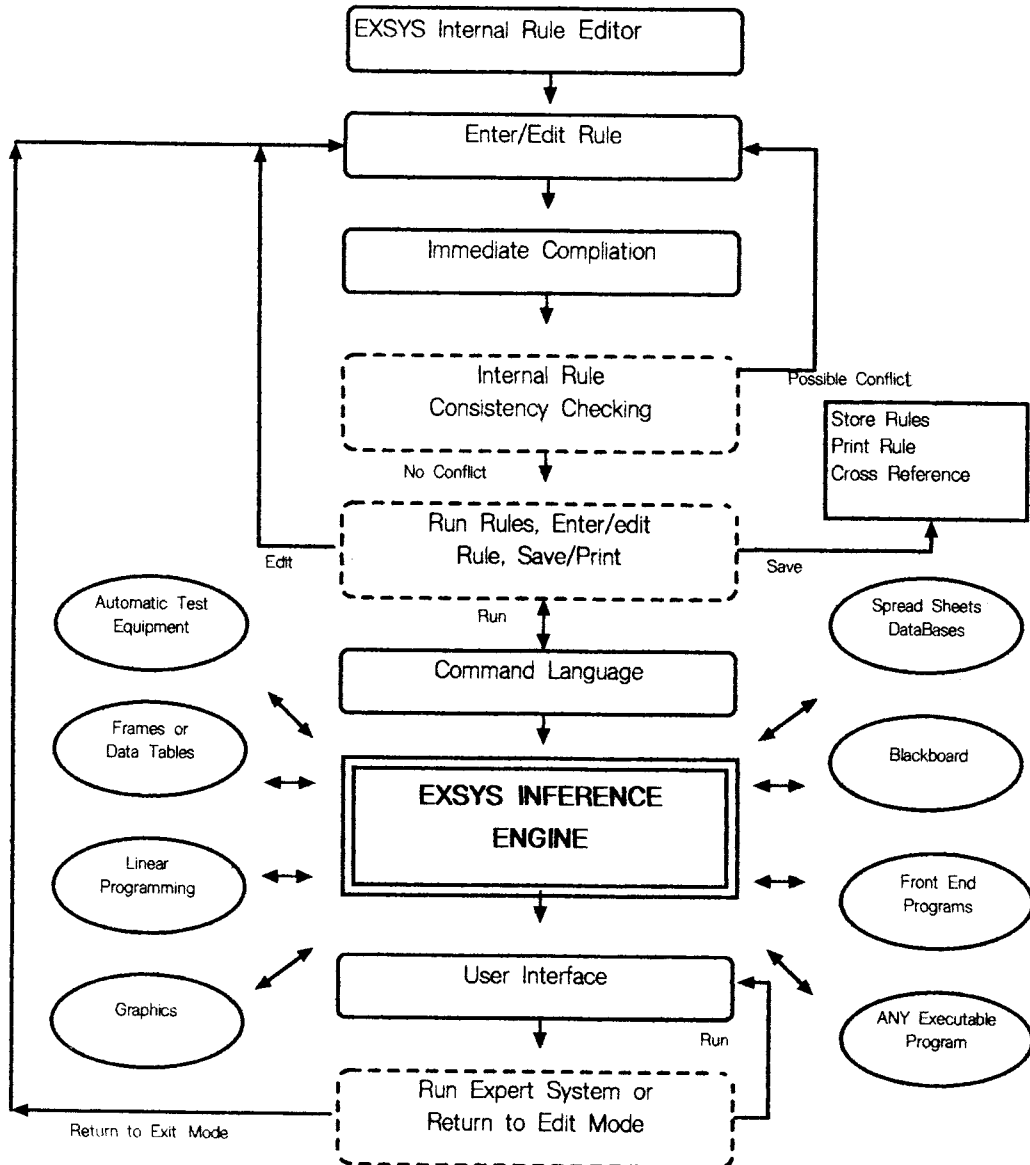
4) Data 입력 형태 구성도



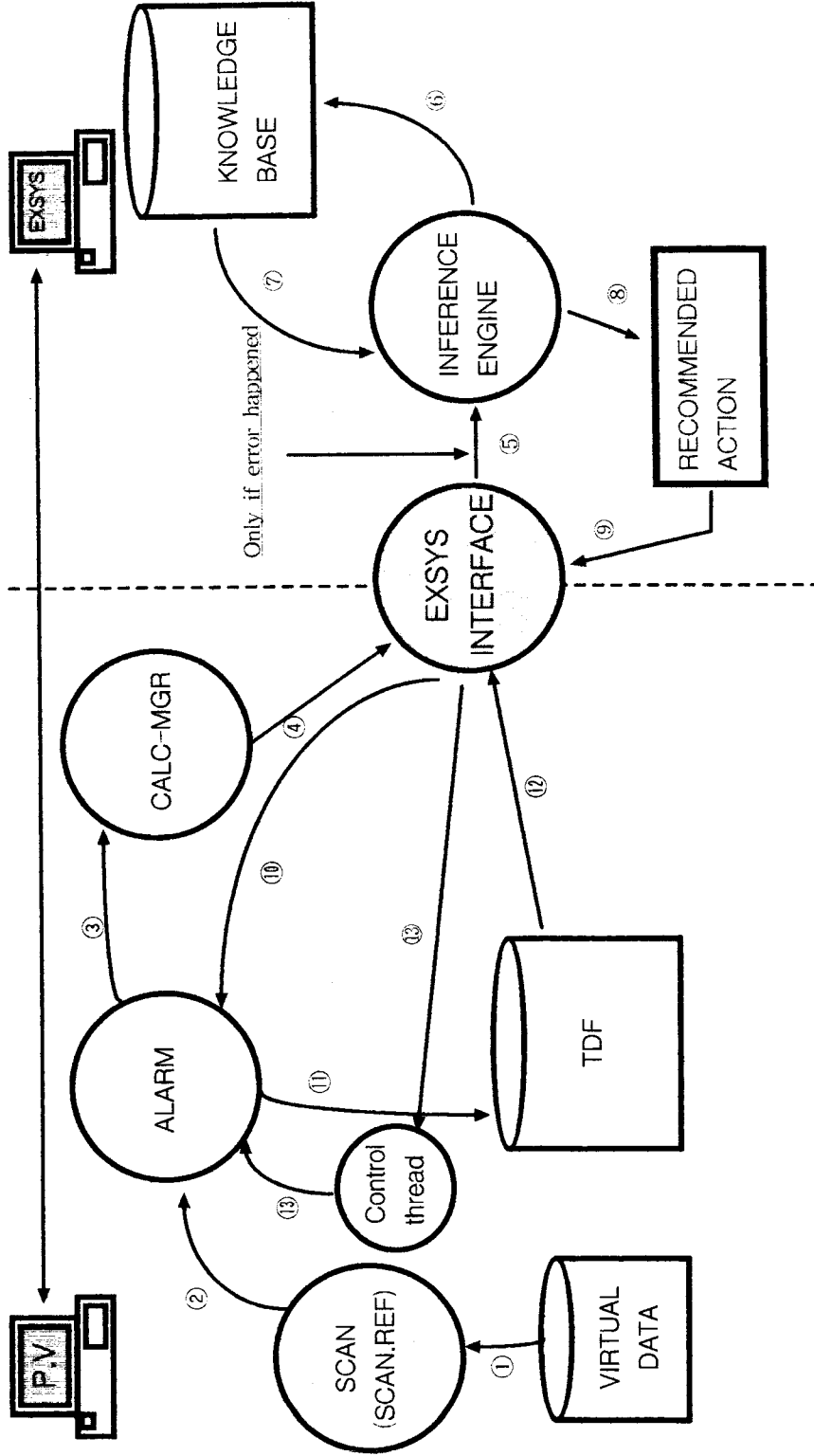
5) plantVIEW와 EXSYS의 Data 교환 형식

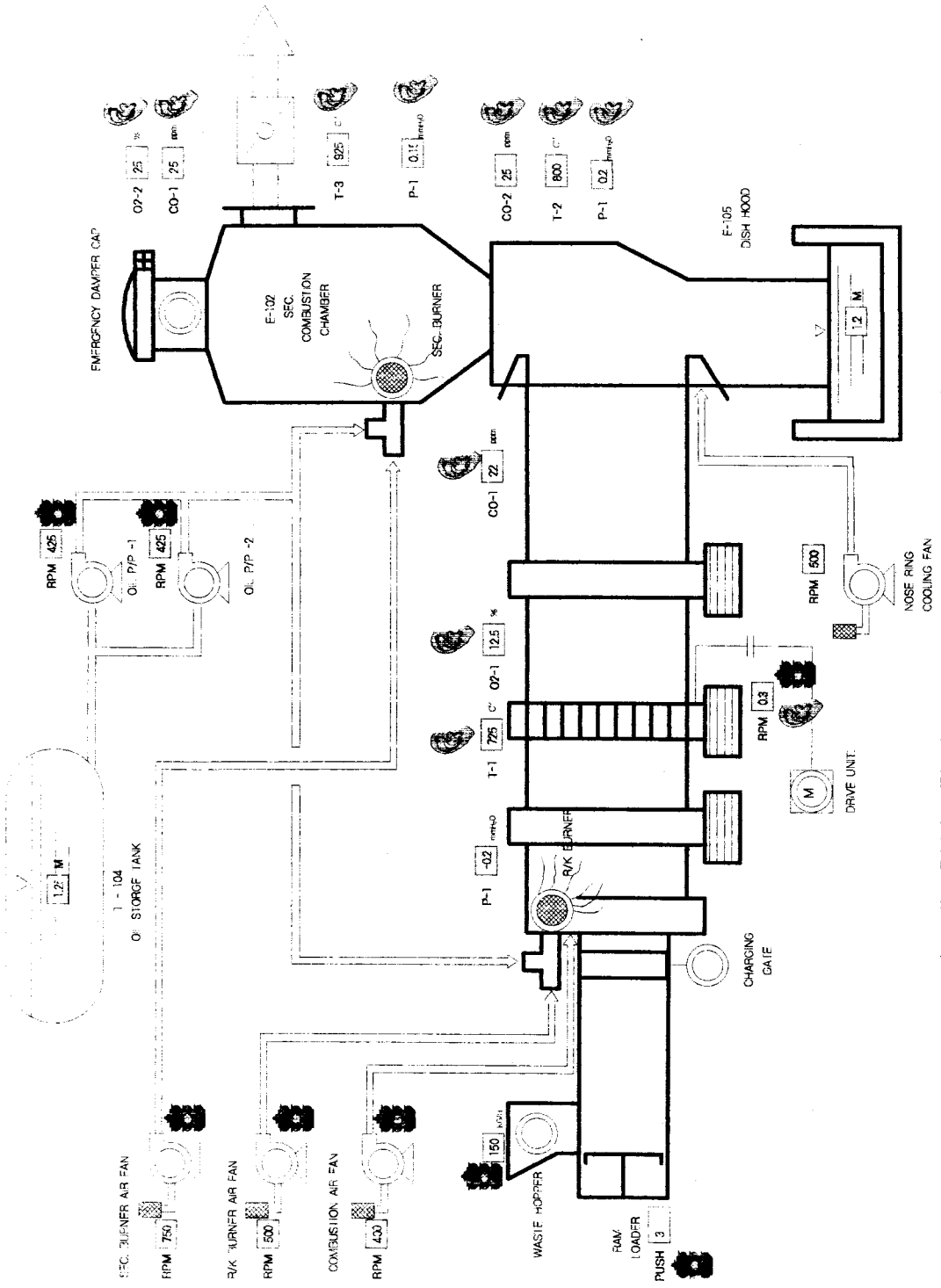


6) EXSYS™(전문가시스템 구현 Tool) 구성도



7) 지능형시스템의 구조 및 실행순서 Diagram





8) 지능형시스템상의 Rotary Kiln 소각로 구현화면

7. 소각공정 지능제어시스템 기대효과

가) on-line 지능형시스템의 구현

나) on-line 데이터 입력을 통한 공정관리 신뢰도 향상

다) 지능형시스템을 통한 공정제어 및 감시 기능의 향상

라) 도시쓰레기 소각로에 대한 실질적인 공정조업 지식베이스 구축

마) 공정자동화를 통한 조업의 편의성 증대

바) 각종 현장 경험지식 이용을 통한 작업효율 증대

사) 원거리 현장과의 접속을 통한 관리의 편의성 증대

아) 현장 조업자의 이직에 따른 불연속적인 조업문제 해결

