

나프타 개질공정을 위한 이상 진단시스템의 구현 On the Implementation of Failure Diagnosis System for Naphtha Reforming Process

차 운 옥*

Abstract

A diagnosis system for naphtha reforming process has been designed and implemented using expert system building technique. The system is composed of knowledge base, inference engine, user interface, database and database interface. The concept and the method of this system may be applied to development of other systems for the reforming process.

1. 서 론

석유의 개질(Reforming) 공정은 원유로부터 얻은 나프타(Naphtha)를 수소와 반응시켜서 품질이 좋은 휘발유를 제조하기 위한 것으로서, 특히 근래에는 국내의 휘발유 소비량이 급증함에 따라 각 정유공장에서 가장 중요한 위치를 차지하고 있는 공정이다(1). 개질공정의 운전조건은 원료인 나

프타의 특성에 따라서 다양하게 변화하지만, 어느 경우에도 휘발유의 생성량이 많고 또한 생성되는 휘발유의 옥탄가가 높게 얻어지도록 조업을 하고 있다. 개질공정의 대표적인 조업변수로는 반응기 체로서 첨가되는 수소의 압력(P_{H_2}), 수소와 반응물 나프타의 비율($H_2/naphtha$), 반응기의 온도(T), 반응기내에서의 반응물의 흐름속도(LHSV) 등이 있으며, 이들 조업조건이 변함에 따라서 생성되는

* 한성대학교 전산통계학과

LPG, 수소와 휘발유의 양이 결정됨은 물론 휘발유중에 포함된 방향족 화합물의 양(Content of aromatics)과 휘발유의 옥탄가(ROK)가 변하게 된다(2).

개질공정에서는 조업조건중의 어느 하나만 변화해도 생성물의 양과 품질이 동시에 변화하기 때문에 최선의 조업효과를 얻으려면 장기간에 걸친 조업경험이 필요하다. 국내의 정유공장에서 개질공정의 운전은 다년간의 경험을 축적한 현장 엔지니어들의 경험에 상당히 의존하고 있으며, 예기치 않던 조업이상이 생긴 경우에도 대개는 이들의 경험을 토대로 하여 해결해 나가고 있는 실정이다. 그러나 이와 같이 현장 엔지니어의 경험에만 의존하여 조업하는 경우에는 문제해결의 성공율을 예측하기 힘들 뿐만 아니라 설명 해결이 되는 경우라도 불필요한 시행착오를 거치게 되며, 그 과정에서 상당량의 원료 나프타를 낭비하고 품질이 낮은 휘발유를 생성하게 된다.

개질공정의 조업에 있어서 흔히 제기되는 문제들은 1) 원료나프타의 물성이 바뀌었을때 이에 대응하여 품질이 좋은 휘발유를 많이 생산할 수 있는 새로운 조업조건을 찾는일, 2) 정상적으로 운전되던 공정에 이상이 생겼을 때에 그 원인을 신속히 찾아내고 대응방안을 강구하는 일, 3) 운전자의 실수로 인하여 야기되는 조업이상의 결과를 최소화하는 일 등이다. 이 연구에서는 위의 문제들 중에서 조업이상이 생겼을 때에 그 원인을 빨리 발견하고 이에 대한 적절한 조치를 제시함으로써 불필요한 원료의 낭비를 막고 생성물의 품질을 최선으로 관리할 수 있도록 하는 진단시스템을 전문가시스템 기법을 이용하여 개발하였다. 이 시스템의 특징은 별도의 실험을 통하여 얻은 조업변수와 생성물 특성간의 상관관계를 이용하여 얻은 데이터베이스를 활용함으로써, 개질공정에 대한 전문적인 경험이 축적되지 않는 사람이라도 시스템의 질문에 응답을 해 나가면서 쉽게 조업이상의 원인을 발견하고 이에 대한 대

응방안을 습득할 수 있도록 한 점이다. 아래에서는 이와 같은 진단시스템을 구현한 과정을 설명하고, 시스템의 사용결과를 예시하였으며, 끝으로 시스템의 한계와 개선방향에 대하여 검토하였다.

2. 조업변수와 생성물 특성간의 상관관계

개질공정에서 운전조건은 통상적으로 아래의 범위내에서 변화한다.

반응기 입구온도	: 480~520℃
수소압력	: 20~35 기압
수소/나프타의 비	: 4~12
반응물의 유량	: 1~2hr ⁻¹

여기서 반응물의 유량은 LHSV(Liquid Hourly Space Velocity)로 표시하였는데, 이것은 시간당 흘러가는 액체반응물의 유량을 반응기의 부피단위로 표시한 것이다. 예를 들어 유량이 2hr⁻¹인 경우는 한시간에 반응기 부피의 두배에 해당하는 액체 반응물이 흘러감을 의미한다. 이같은 조업의 결과로 얻어지는 생성물의 특성으로는 앞에서 언급한 바와 같이 수소의 생성량, LPG의 생성량, 휘발유의 옥탄가, 휘발유중에 포함된 방향족 화합물의 함량등이 중요하다. 휘발유의 생성량을 높이기 위하여는 LPG의 생성을 억제하는 것이 좋으며 휘발유의 옥탄가를 높이기 위하여는 그중에 포함된 방향족 화합물의 함량이 높을수록 좋다. 조업변수가 위의 범위내에서 변화할때에 생성물의 특성이 변화하는 내용을 별도의 실험을 통하여 얻었는데(3), 그 결과를 요약하면 (표1)에서와 같다.

(표1) 조업조건에 따른 생성물 특성의 변화

조업조건 \ 생성물특성	수소생성량 (무게 %)	LPG생성량 (무게 %)	방향족화합물 함량(무게%)	옥탄가
반응온도(°C): 480→520	0.4→1.7 d=1.3	12→17 d=5	50→55 d=5	92→104 d=12
수소압력(기압): 20→35	0.8→0.4 d=-0.3	10→12 d=5	55→49 d=-6	96→94 d=2
수소/나프타의 비: 4→12	3→2.8 d=-0.2	13→11 d=-2	48→46 d=-2	90(불변) d=0
반응물유량 (hr ⁻¹): 1→2	0.7→0.8 d=0.1	13→10 d=-3	52(불변) d=0	96→94 d=-2

위의 결과에서 보면 수소/나프타의 비가 4에서 12까지 증가하더라도 생성되는 휘발유의 옥탄가는 항상 90으로서 변화하지 않으며, 반응물 유량에 따라서 휘발유중의 방향족 화합물 함량도 불변이다. 각 조업변수의 변화가 생성물 특성을 결정하는데에 각각 독립적으로 작용하는지 아니면 상호 복잡한 역할을 하는지에 대하여는 많은 논란이 있지만(2), 이 연구에서는 작업을 단순화하기 위하여 각각 독립적인 작용을 하는것으로 간주하였다. 또한 조업변수가 변화에 따라서 생성물의 특성은 선형적으로 변화한다고 가정하였는데, 이것

은 표1에서 생성물의 특성 변화폭이 크지 않은 점을 고려할때에 타당한 가정이라고 볼수 있다.

3. 데이터베이스의 구축

(표1)의 결과로부터 조업변수와 생성물 특성간의 상관관계식을 도출하기 위하여 이 연구에서는 (표2)에 표시된 표준조업조건과 이때의 생성물 특성을 기준으로 하여 이로부터의 변화폭을 명시하는 방법으로 데이터베이스를 구축하였다.

(표2) 표준조업조건에서의 생성물 특성

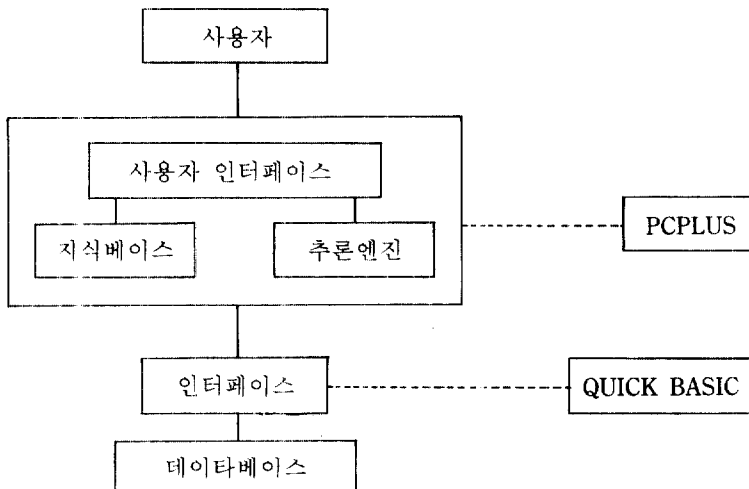
표준조업조건	수소생성량 (무게 %)	LPG생성량 (무게 %)	방향족함량 (무게 %)	옥탄가
반응온도 : 480°C 수소압력 : 25기압 수소/나프타의 비 : 8 반응물유량 : 1.5hr ⁻¹	0.1	12	50	92

각 조업변수의 범위를 등간격으로 나누어 5개의 값으로 구분하고(예 : 온도의 경우 480°C, 490°C, 500°C, 510°C, 520°C) 모든 변수들이 가지는 가능한 값의 조합의 조건하에서의 생성물의 특성을 다음과 같은 방법으로 계산하였다. 예를 들어 온도 : t, 수소압력 : p, 수소와 나프타원료의 비율 : h, 반응물의 유량 : 1h라 했을 경우 먼저 표준조업 변수 조건과의 차이 $dt=t-480$, $dp=p-25$, $dh=h-8$, $d1h=1h-1.5$ 를 계산한다. 주어진 조건하에서의 LPG의 생성량을 계산하기 위해서는 각 변수가 최소값에서 최대값으로 변했을때의 LPG의 변화량을 변수의 변화한 값으로 나누어 선형관계식의 기울기를 구하고 표준조업변수와와의 차이를 곱해 각 변수의 현재 조건하에서의 LPG의 변화량을 계산한다. 각 변수에 대한 LPG의 변화량을 합해서 표준 조업조건하에서의 LPG의 생성량 12를 더해 주어진 조건하에서의 LPG의 생성량을 계산하였다. 즉 온도 t, 수소압력 p, 수소와 나프타원료의 비율 h, 반응물의 유량 1h하에서의 LPG의 생성량은 $(5/40 * dt) + (5/15 * dp) + (-2/8 * dh) + (-3 * d1h) + 12$ 가 된다. 같은 방법으로

특정한 조건하에서의 방향족 화합물의 분율, 휘발유의 옥탄가, 수소의 생성량을 계산하였다. 조업변수들이 가질수 있는 모든 값의 조합에 대해 생성물의 특성을 계산한 다음 휘발유의 옥탄가의 값(90-106)에 따라 17개의 화일에 저장하였다. 이때 온도, 수소압력, 수소와 나프타원료의 비율, LPG, 방향족 화합물의 분율, RON의 값은 변수값으로, 반응물의 유량과 수소의 생성량은 값의 변화가 다른 변수들에 비해 상대적으로 작으므로 소수점 둘째자리 실수값으로 저장하였다.

4. 시스템의 구성

석유 개질공정을 위한 진단시스템은 지식베이스와 추론엔진, 사용자 인터페이스, 데이터베이스로 구성되어 있다. 본 시스템은 개인용 컴퓨터 환경하에서 전문가 시스템 개발도구인 Personal Consultant Plus(6)와 데이터베이스와의 인터페이스를 위한 QUICK BASIC언어를 사용하여 구현하였다. 시스템의 구성도는 그림1과 같다.



(그림1) 시스템의 구성도

(1) 지식베이스

지식베이스는 서언, 파라미터(parameter), 규칙(rule)들로 구성된다. 서언은 본 시스템을 사용할 때 디스플레이되는 내용으로 시스템의 목적과 사용방법, 주의사항등을 포함한다. 파라미터는 시스템 구성에 필요한 변수를 나타내며 이에 포함하는 내용으로는 파라미터가 가질 수 있는 값의 형태, 값의 범위, 사용지로부터 본 시스템에서 필요로 하는 정보를 얻기 위한 질문내용 즉 조업이상이 생기기 전까지의 조업조건과 생성물의 특성, 조업이상 후의 생성물의 특성에 대한 질문등이다. 규칙은 어떤 결정을 내리기 위해 파라미터를 이용하는 하나의 법칙을 의미하는데 'IF 조건 THEN 결과'의 형태를 가진다. 본 시스템에서는 시스템의 수행에 필요한 규칙들과 조업이상의 원인을 알아내는 규칙들로 구성되었다.

(2) 추론엔진

주어진 문제의 해결을 위해 지식베이스에 있는 규칙들을 탐색하여 추론(inference)과 통제(control)를 하는 부분이다(4). 본 시스템에서는 사용자가 질문에 대한 답을 입력시키면 해당 데이터화일에 접근하는 프로그램을 수행시키고 본 시스템에서 목적으로 하는 조업이상의 원인을 알아낼 수 있도록 추론을 행한다. 추론방식은 역방향 추론방식(backward chaining)을 기본으로 하고 규칙에 Antecedent Property를 주면 순방향 추론방식(forward chaining)이 가능하게 된다.

(3) 사용자 인터페이스

사용자와의 대화를 통해 사용자로부터 정보를 얻고 조업이상의 원인을 디스플레이해 주는 부분이다. 또 결론에 대해 왜 그런 결론을 얻었는지에 대한 근거와 추론과정을 윈도우를 통해 설명해주는 부분이다.

(4) 데이터베이스와의 인터페이스

데이터베이스와의 인터페이스 부분에서는 다음과 같은 과정을 수행한다.

1) 사용자가 입력한 조업이상이 생기기 전까지의 조업조건과 생성물의 특성에 대한 정보를 가지고 생성물 중 휘발유의 옥탄가 값에 따른 해당 데이터화일에 접근한다. 각 생성물의 특성에 대한 데이터베이스상의 조업변수의 조건을 검색한 후 사용자의 입력조건과 데이터베이스상의 조업조건과의 차이를 변수별로 계산해서 화일에 저장한다. 이는 데이터화일의 내용은 특정한 가정하에서 얻어진 자료이므로 실제 조업조건과는 차이가 있으며 나중에 조업이상이 생긴 이후의 조업변수의 조건을 데이터베이스를 이용하여 구한 후 그 값을 수정(modify)하기 위함이다.

2) 사용자가 입력한 조업이상 이후의 각 생성물의 특성에 대한 정보를 이용해서 휘발유의 옥탄가 값에 따른 해당 데이터화일에 접근한다. 각 생성물의 특성에 대한 데이터베이스상의 조업변수의 조건을 검색해서 1)에서 구한 값을 각 조업변수의 값에 더하면 조업이상 이후의 생성물의 특성을 생성시키는 조업변수의 조건이 얻어진다. 이를 화일에 저장한다.

5. 개발된 진단시스템의 평가 및 토의

(1) 시스템의 특성

본 시스템의 개발을 위해 전문가 시스템 기법을 이용하였다. 전문가시스템은 여러 문제분야에 이용할 수가 있는데 관측자료로부터 시스템의 이상을 추론하는 진단부분은 전문가 시스템으로 개발하기에 적합한 분야이다(7). 전문가 시스템의 성능은 전문적 지식을 얼마나 많이 저장하여 이용하느냐에 달려있다(5). 본 시스템에서는 개발공

정에 대한 전문적 지식으로 별도의 실험을 통해서 얻은 개질공정에서의 조업변수의 변화와 생성물 특성과의 상관관계로부터 얻은 데이터베이스를 이용하였다. 또 지식베이스의 구성은 시스템의 수행을 위한 규칙과 조업이상의 원인을 찾아내는 규칙들로 구성되었다. 개질공정 과정에서 조업이상을 발견하는 즉시 현장 엔지니어가 본 시스템을 이용하게 되면 컴퓨터와의 대화를 통해 이상의 원인을 짧은 시간내에 찾아 내어 필요한 조치를 취할 수 있게 된다. 또 왜 그러한 결론을 얻었는지를 질문하면 (시스템 메뉴 상에서 HOW선택) 현재의 생성물의 특성이 얻어지기 위한 조업조건을 디스플레이해주고 지금까지의 조업조건과 달라진 변수조건을 알아내서 이상의 원인을 찾아낸 과정을 설명해줄 수 있다. 따라서 본 시스템을 이용하게 되면 현장 엔지니어에게만 의존하던 개질공정에서의 이상진단을 컴퓨터를 통해서 해결할 수 있게 된다.

(2) 시스템의 사용 예

다음에서는 시스템과의 대화를 통한 실제 수행과정을 보인다.

／먼저 지금까지의 조업변수의 조건을 묻는다.／

- What is the temperature (in degree C) under the scheduled operating condition ? (Answer with integer value between 480 and 520.)

* 500

- What is the pressure (in atmosphere) under the scheduled operating condition ? (Answer with integer value.)

* 35

- What is the hydrogen/Naphtha ratio under the scheduled operating condition ? (Answer with integer value)

* 12

- What is the LHSV (in 1/hour) under the scheduled operating condition ?

* 1.25

／조업이상 이전의 생성물의 특성을 묻는다.／

- What is the LPG yield (in weight percentages) that you have been obtaining so far ? (Answer with integer value.)

* 17

- What is the content of aromatics in the gasolin product (in weight percentages) that you have been obtaining so far ? (Answer with integer value.)

* 48

- What is the RON value for the gasolin product that you have been obtaining so far ? (Answer with integer value.)

* 97

- What is the fraction of the hydrogen product (in weight percentages) that you have been obtaining so far ?

* .23

／조업이상이 생기기 전까지의 실제 조업변수의 조건과 생성물의 특성값을 가지고 데이터베이스에서 찾은 조업변수 조건과의 차이 delta값을 계산한다.／

／생성물의 특성이 변화한 것이 있는지를 묻는다. 변화한 것을 선택하면 된다. 변화한 것이 여러이면 다 선택하면 된다.／

- Are there any changes in the production ?

Yes

- LPG
- AROMATICS
- RON

· H2P
/RON(휘발유의 옥탄가)을 선택한 경우/

/RON(휘발유의 옥탄가)과 H2P(수소의 생성량)를 선택한 경우/

- What is the RON value for the gasolin product that you are obtaining now? (Answer with integer value.)

* 96

/시스템의 수행결과를 나타내준다./

Can't find out the reason of change with the given information.

/생성물의 특성이 변화한 것이 있는지를 묻는다.
/

- Are there any changes in the production?

Yes

- LPG
- AROMATICS
- RON
- H2P

- What is the RON value for the gasolin product that you are obtaining now? (Answer with integer value.)

* 96

- What is the fraction of the hydrogen product (in weight percentages) that you are obtaining so far?

* .36

/시스템의 수행결과를 나타내준다./

Hydrogen/Naphtha ratio and LHSV have been changed, so check them.

/시스템 메뉴에서 HOW를 선택해서 왜 그런 결론을 얻었는지를 질문했을때 설명해주는 화면이다./

FAULT DIAGNOSIS

Hydrogen/Naphtha ratio and LHSV have been changed, so check them.

How :

Yes

- Present LHSV : : (1.5 100 *IMPORT*)
- Present hydrogen/naphtha ratio : : (10 100 *IMPORT*)
- Present hydrogen pressure : : (35 100 *IMPORT*)
- Present temperature : : (500 100 *IMPORT*)
- Answer is obtained : : (YES 100 RULEO13)

1. Use arrow keys or first letter of item to position cursor.
2. Select all applicable responses.
3. After making selections, press RETURN/ENTER to continue.

FAULT DIAGNOSIS

```

Hydrogen/Naphtha ratio and LHSV have been changed, so check them.
answer is obtained : : (YES 100 RULE013)
Determined to be : YES
... by using RULE013

If 1) Present temperature is equal to temperature, and
   2) Present hydrogen pressure is equal to hydrogen pressure, and
   3) It is not the case that present hydrogen/naphtha ratio is
      equal to hydrogen/naphtha ratio, and
   4) It is not the case that present LHSV is equal to LHSV,
Then 1) It is definite (100%) that answer is obtained, and
     2) Inform the user of this decision.

** More - RETURN/ENTER to continue
    
```

／현재의 생성물의 특성, 즉 LPG생성량이 17이고 방향족화합물의 함량이 48, 휘발유의 옥탄가가 96, 수소의 생성량이 36이 얻어지기 위한 조업 변수의 조건을 데이터베이스에서 찾으면 반응온도 500℃, 수소압력 35기압, 수소/나프타의 비 10, 반응물 유량 1.75hr⁻¹가 얻어지나 조업변수의 조건을 수정하기 위한 delta값을 적용시키면 다른 조건은 변화가 없고 반응물 유량이 1.5hr⁻¹로 된다. 조업이상이 생기기 전까지의 조업조건과 달라진 것은 수소/나프타의 비와 반응물 유량인 것을 설명해 주는 내용이다.／

(3) 시스템의 한계 및 개선방향

1) 한계

본 시스템의 한계를 적으면 다음과 같다. 첫째, 데이터베이스 구축시 조업변수의 변화에 따른 생성물의 특성의 변화가 선형인 관계를 가진다고

가정하였으므로 실제의 조업 조건하에서의 생성물의 특성과는 차이가 있다. 본 시스템에서는 실제 조업조건과 데이터베이스에서 얻어지는 조업조건과의 차이를 계산해서 나중에 조업이상이 생겼을 때의 생성물의 특성이 얻어지는 조업조건의 값에 더해 줌으로써 어느정도 시스템에서 필요로 했던 가정의 영향을 축소시키려고 하였다. 둘째는 데이터베이스를 구축할때 각 조업변수의 값의 변화를 5개의 값으로 구분하여 모든 변수들이 가질 수 있는 모든 가능한 값의 조합을 생각하여 주어진 조건하에서의 생성물의 특성을 계산하였다. 따라서 본 시스템을 사용할때 사용자가 입력하는 생성물의 특성이 데이터베이스에 기록되어 있는 내용과 다른 경우에는 조업이상의 원인을 찾아내지 못하는 문제점이 있다. 셋째로, 본 시스템은 미국 텍사스 인스트루먼트사에서 개발한 Personal Consultant Plus를 사용하여 개발하였기 때문에 영어를 사용한다는 것이 또 하나의 단점이 될 수 있다.

마지막으로, 실제의 개질공정은 통상적으로 세계의 반응기가 직렬로 연결되어 있는데(2) 비하여 이 연구에서는 한개의 반응기를 대상으로 한 점이 한계로 지적될 수 있다. 그러나, 이 문제는 이 연구에서 얻은 결과를 그대로 세계의 반응기에 대하여 확대 적용하면 해결이 가능한 것으로서 앞으로의 개선 연구에서 다루어질 내용이다.

2) 개선방향

이 연구의 결과는 다음과 같은 사항들을 개선하면 더욱 실용적인 시스템으로 발전시킬 수 있을 것이다. 즉, 각 조업변수의 값의 변화를 5개 이상으로 더 세분화시켜 모든 변수들이 가질 수 있는 모든 가능한 값의 조합을 생각하여 주어진 조건 하에서의 생성물의 특성을 계산해서 데이터베이스를 구성한다. 이렇게 하면 보다 현실적인 데이터가 얻어지고 사용자의 입력내용에 대한 조업이상의 원인을 쉽게 찾아줄 수 있게 되지만 데이터베이스가 방대해진다는 문제점이 있다. 또 다른 방법으로는 사용자가 입력한 생성물 특성의 값이 데이터베이스의 내용과 다른 경우 가장 근사한 경우의 생성물 특성의 값으로 수정시켜 조업이상의 원인을 찾아내도록 할 수 있다. 또 본 시스템을

구현할때 사용한 방법을 기초로 하여 한글이 가능한 개발도구를 이용하게 되면 보다 더 실용적인 시스템이 될 수 있겠다. 이 연구의 결과를 직렬로 연결된 세계의 반응기에 대하여 확대 적용하는 문제도 앞으로 다루어질 문제이다.

6. 결 론

본 논문에서는 개질공정에서의 조업이상의 원인을 찾아주는 진단시스템을 구현하였다. 본 시스템에서는 사용자가 시스템과의 대화를 통해 입력한 조업이상이 생기기 전까지의 조업변수의 조건과 생성물의 특성, 조업이상 이후의 생성물의 특성값을 가지고 조업이상의 원인을 찾아내어 필요한 조치를 취하도록 해준다. 또 특정한 결론이 얻어지게 된 이유와 과정을 설명해 줄 수 있다. 본 연구에서 구현한 시스템의 개념과 방법을 이용하면 개질공정에서의 다른 문제, 즉 원료나프타의 물성이 바뀌었을 때 이에 대응하여 품질이 좋은 휘발유를 많이 생산할 수 있는 새로운 조업조건을 찾는 문제를 해결해 주는 시스템의 개발도 가능하다고 하겠다.

參考文獻

1. 한국화학공학회(1982), 한국의 화학공업
2. Edgar, M.D. (1983), "Catalytic Reforming of Naphtha in Petroleum Refineries", p124 in "Applied Industrial Catalysis, Vol. 1", (Leach, B.E., editor), Academic Press, N.Y.
3. KAIST보고서 (1989), BS2I1273-3535-6, p72-100, pp. 178-184
4. 차운옥(1990), "판별분석을 위한 통계전문가 시스템의 구현", 박사학위 논문, 성균관대학교
5. Barr, A. and Feigenbaum, E.A.(1981), The Handbook of Artificial Intelligence, Heuristech Press, Stanford, California
6. Data System Group(1987), Personal Consultant Plus Reference Guide, Texas Instrument Inc., Austin, Texas
7. Waterman, D.A.(1985), A Guide to Expert Systems, Addison-Wesley Publishing Company