

<논 문> SAE NO. 96370128

# 고성능 압축기 밸브시스템의 설계를 위한 전문가 시스템의 개발

## Development of an Expert System for Design of High Performance Compressor Valve System

성 기 룡,\* 최 일 곤,\*\* 맹 주 성\*  
K. R. Sung, I. K. Choi, J. S. Maeng

### ABSTRACT

An expert system to design compressor valve systems has been developed. Design process is viewed as a chain of decisions based on the results of necessary analyses. Actual design is implemented by the interaction between the expert system and the user. In this work, it is demonstrated how a final design is achieved by utilizing the rule bases and analysis capability of the system. The structure of the rule bases and related parameter studies are also explained. Advantages of using an expert system approach for valve designs are explained using a practical example.

주요기술용어 : Expert system(전문가시스템), Sensitivity analysis(민감도 해석), Valve design system(밸브설계시스템), Valve performance(밸브성능), Reliability(신뢰도)

### 1. 서 론

밸브 시스템의 설계는 압축기 설계를 하는데 있어서 가장 중요한 부분이다. 설계자는 신뢰성 있고 효율적인 밸브의 설계과정을 개발하기 위하여 밸브의 신뢰도 뿐만 아니라 좋은 성능을 위해 요구되는 조건들을 고려하여야 한다<sup>1), 2), 3)</sup>.

임의의 설계도 여기에 요구되는 성능과 설계시 방에 의해 주어지는 목적과 구속조건을 가지고

있다. 설계시방에는 입/출력 조건, 문제에 대한 특성과 물리적인 한계를 포함한다. 설계 작업은 구속범위내에서 목적을 만족하기 위한 해석, 평가 그리고 판단결정의 연속적인 행위로 관찰되어 질 수 있다. 해석단계는 필요한 설계정보를 만들기 위해 이론적이거나 또는 수치적일 수 있다. 평가와 판단결정단계에서는 중간결과나 최종결과를 만들기 위하여 설계 정보를 해석한다. 여기서 만들어진 각 판단은 최종설계를 완성하기 위한 가이드역활을 한다.

설계정보를 얻는 방법에는 해석/모사에 의해 정보를 얻는 방법과 설계자의 지식이나 경험에 의한 발견적 지식에 의해 얻는 방법이 있다. 전

\* 한양대학교 기계공학과

\*\* 정희원, 한양대학교 기계공학과

자의 방법은 사용가능한 해석과 모사방법을 사용하여 얻는 것이고 후자는 특정한 정보가 전자에 의해 얻어질 수 없는 경우에 사용하는 방법이다. 이 방법은 설계문제의 복잡성이 해석/모사 방법에 의한 수준을 넘어서는 경우에 많이 사용한다.

만일 전문가 시스템을 특정한 세부분야의 응용에 적용할 수 있다면 복잡하고 반복적인 설계를 효율적으로 다루는 데 적용할 수 있다<sup>3), 6), 7), 12), 13)</sup>. 설계과정을 대신하기 위한 전문가 시스템은 해석/모사 부분과 판단결정과정부분과의 적절한 조합으로 구성할 수 있다<sup>5), 8), 9), 10), 11)</sup>. 특히 해석/모사 부분에 대한 전문가 시스템의 응용은 여러 가지 조건하에서 연산작업을 실행할 수 있도록 공정을 확립하고 이들 부분의 상호작용과 구성요소들을 모형화 한다. 또한 사용자로 하여금 기존조건이나 가설적인 조건을 평가하기 위하여 모형을 제어할 수 있는 기반을 제공해준다.

본 연구에서는 일반적인 압축기 밸브설계의 복잡성과 반복적인 특성을 극복하면서 더욱 융통성 있는 설계과정을 개발하기 위하여 전문가 시스템을 도입하였다. 여기서 개발한 전문가 시스템의 목적은 현재 설계상태에서의 성능을 해석하고 설계자가 각 설계결정 단계에서 적절한 판단을 할 수 있도록 필요한 지식을 제공하기 위한 것이다. 여기에서는 전문가 시스템 소프트웨어인 EX-SYS Professional을 사용하여 개발하였다. 규칙베이스(Rule base)를 사용한 전문가 시스템에 의해 사용되어진 정보들은 밸브 설계시스템내의 밸브 해석 프로그램으로부터 제공되었다. 이들 해석 결과들 설계 가이드에 따라 비교 분석되고 설계를 향상시키기 위하여 설계에 대한 진단과 제안은 전문가 시스템의 규칙베이스에 의해 만들어진다. 중간단계나 최종단계의 설계에 대한 성능들은 모사 프로그램에 의하여 흡입과 배출과정에서의 유량에 대한 압력분포를 나타내는 P-V 선도과 이상 P-V 선도과의 비교에 의해 확인할 수 있다.

개발된 전문가 시스템을 사용함으로써 얻는 이점들은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- 1) 전문가 시스템은 해석적 도구와 설계를 위한 지침기능을 제공한다.

- 2) 전문가 시스템은 효율적이고 철저한 반복을 통한 설계를 가능하게 해준다.
- 3) 전문가 시스템은 일관된 설계과정을 유지시켜준다.

## 2. 설계과정

설계과정을 자동화하기 위한 첫 번째 단계로서 설계자가 채택한 전형적인 설계과정을 생각해 볼 수 있다. 그 과정에서 일체화된 단계들은 해석, 분석, 진단 그리고 판단과 같은 서로 다른 여러 가지 영역들로 나누어 질 수 있다.

밸브 설계의 기본적인 과정은 다음과 같은 단계들로 구성되어 진다.

- 1) 이상적인 P-V 선도에 기초한 밸브 포트들의 대략적인 크기 결정
- 2) 밸브 리드의 초기 설계 결정. 기존 설계는 단계 1)과 2) 대신에 사용할 수 있다.
- 3) 효율성과 신뢰도를 통하여 설계의 성능을 해석한다.
- 4) 단계 3)에서의 결과에 기초하여 현재 설계를 평가한다.
- 5) 평가결과가 만족스러우면 수용하고 그렇지 않으면 단계 4)에서 진단된 문제들을 해결하기 위해서 설계를 수정한다.

본 연구에서 개발한 시스템에서는 전문가 시스템을 사용하여 단계 4)와 5)를 수행하는 과정에서 밸브해석 프로그램에 해당하는 단계 1), 2), 3)을 수행하게 된다. 여기에서는 전문가 시스템 부분에 해당하는 단계 4)와 5)를 상세하게 설명하기로 한다.

## 3. 설계기준

성공적인 밸브시스템을 만들기 위해서는 다음과 같은 3가지 설계요구를 만족하여야 한다.

- 1) 열효율의 손실을 최소화하기 위한 충분한 유동면적  
유효유동면적은 포트면적과 밸브 굽힘거리에 의해 결정하고 다음과 같다.

$$A_e = \frac{K_0 A_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{A_0}{A_1}\right)^2}} \quad (1)$$

여기서  $K_0$ 는 유동계수,  $A_0$ 는 포트면적,  $A_1$ 은 밸브와 밸브 판 사이의 유동면적이다. 유효 유동면적과 요구되는 체적유량으로부터 밸브시스템을 통한 유동의 속도를 계산할 수 있고 또한 Mach 수를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$M = \frac{v}{c} \quad (2)$$

여기서  $M$ 은 Mach 수,  $c$ 는 작동조건상의 냉매가스 내에서의 음속,  $A_e$ 는 유효유동면적이다. 과도한 효율의 손실을 방지하기 위하여 Mach 수는 0.2 이하가 되도록 추천한다.

유동면적이 작을수록 Mach 수는 증가한다. 밸브손실이 밸브의 유동속도의 제곱에 비례하기 때문에 만일 Mach 수가 추천값인 0.2보다 크면 밸브의 효율은 심각한 문제가 될 수 있다<sup>1)</sup>.

2) 체적효율의 손실을 가져오는 역유동을 방지하기 위한 신속한 밸브개폐

작은 유동면적은 큰 밸브력에 의한 높은 밸브 굽힘거리의 원인이 되므로 밸브의 굽힘 작용이 일어날 때 밸브의 평형위치를 넘어가게 된다. 일반적으로 너무 큰 밸브의 굽힘거리는 설계단계에서 해석하기 어려운 밸브의 플러터링과 부분적인 폐쇄와 같은 역효과의 원인이 된다. 밸브의 늦은 개폐는 체적효율의 손실을 만드는 밸브의 역유동을 일으킨다. 이러한 현상을 피하기 위하여 다음과 같은 2가지의 방법을 제안할 수 있다. 첫째는 밸브의 굽힘을 감소시키기 위하여 밸브의 강성을 증가시키는 방법이고 둘째는 밸브제지기를 밸브 시스템에 도입하는 방법이다.

밸브제지기는 일정한 제한범위내에서 밸브의 굽힘을 제한한다. 잘 설계된 제지기는 압축기의 효율을 감소시키지 않으면서 밸브의 플러터와 높은 충격응력을 방지한다. 밸브의 큰 굽힘거리가 반드시 유동을 증가시키는 것은 아니다. 잘 설계된 밸브시스템을 갖기 위하여 밸브제지기의 높이

를 적절하게 결정하여야 한다. 다음식은 제지기의 높이를 결정하는 기준식이다.

$$A_1 = 1.21 A_0 \quad (3)$$

식 (3)으로부터 포트가 원형의 개방이 된다는 가정하에 밸브제지기높이를 구하면 다음과 같다.

$$h_{ref} \propto \sqrt{A_0} \quad (4)$$

제지기의 존재유무는 밸브설계 전문가시스템에서 중요한 역할을 한다.

3) 밸브의 응력에 대한 높은 신뢰도

밸브의 신뢰도는 압축기내에서 고응력에 의한 밸브의 파손이 압축기 전체수명에 손실을 가져오기 때문에 가장 중요한 문제이다. 압축기밸브는 2가지 형태의 피로응력의 영향을 받는다. 굽힘피로와 충격피로, 굽힘피로는 다시 2가지 형태의 응력으로 분류된다. 첫째는 밸브가 충분히 열렸을 때 밸브의 굽힘에 의한 응력이고 이것을 굽힘응력이라 정의하고 다음과 같이 계산한다.

$$\sigma_b = \frac{M_b}{b} \quad (5)$$

여기서  $M_b$ 는 밸브력에 의한 모멘트이고  $Z$ 는 밸브리드의 단면계수이다.

둘째는 밸브가 최대 압력차에 의해 포트속으로 밀려들어갔을 때 생기는 응력이다. 여기서는 이 응력을 굴절응력(inflexion stress)이라 정의한다. 원형포트에 대한 굴절응력은 판굽힘이론에 의해 구하고 다음과 같이 주어진다.

$$\sigma_i = \frac{3}{8} (3 + \nu) r^2 \frac{\Delta P}{l^2} \quad (6)$$

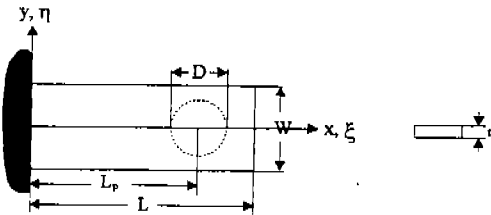
여기서  $r$ 은 포트반경이고  $\nu$ 는 프와송 비이다. 굽힘응력과 굴절응력에 기초하여 밸브의 예상 수명을 평가하기 위하여 피로파손이론을 사용한다.

충격응력은 밸브 끝이 제지기나 밸브시트에 접촉할 때 접촉지점에서 일어난다. 제지기에서 일

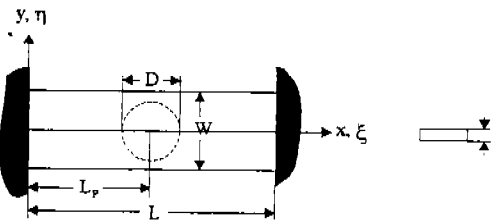
어나는 충격응력은 잘 설계된 제지기에서는 충격속도가 작기 때문에 고려하지 않아도 된다. 밸브대에서의 충격속도는 유동면적이 작으면 밸브의 굽힘이 증가하므로 밸브대에서의 충격속도는 크게 된다. 그러므로 밸브는 큰 충격응력의 영향을 받는다. 본 연구에서는 충격응력대신 충격속도를 사용하여 충격응력을 예측한다. 설계과정에서 충격속도는 추천속도로 나눔으로서 무차원화한다. 추천 충격속도  $v_{imp, recommended} = 5.08m/sec$ 이다<sup>1), 14)</sup>.

이들 설계요구조건에 따라 5가지의 설계기준을 정의하고 또한 이들을 압축기와 밸브의 성능을 나타내는 성능함수로 사용한다. 성능함수는 압축기의 작동조건과 밸브의 설계변수들에 의해 구할 수 있다. 여기서 고려해야할 설계변수로는 밸브 포트 크기, 밸브 길이, 밸브 폭 그리고 밸브 두께 등이다. 이들 설계변수들의 정의는 Fig. 1에서 보여준다. 전문가시스템사용시의 편리를 위하여 이들을 무차원형태로 변환했고 이들의 정의는 다음과 같다.

$$\sigma_{i, n} = \frac{\sigma_i}{\sigma_{i, allowable}} < 1 \tag{7}$$



(a) Cantilever type valve



(b) Both end simply-supported type valve

Fig.1 Various shapes of reed valve

$$\sigma_{b, n} = \frac{\sigma_b}{\sigma_{b, allowable}} < 1 \tag{8}$$

$$M_n = \frac{M}{M_{recommended}} < 1 \tag{9}$$

$$\dot{t}_{c, n} = \frac{\dot{t}_c}{\dot{t}_{c, recommended}} < 1 \tag{10}$$

$$v_{imp, n} = \frac{v_{imp}}{v_{imp, recommended}} < 1 \tag{11}$$

식 (10)의 조건은 밸브폐쇄시간을 제한하기 위한 것이다. 밸브폐쇄시간은 밸브 동역학의 함수로서 폐쇄운동이 단일모드운동으로 간주될 때 다음과 같은 형태로 표현한다.

$$\dot{t}_c = \frac{\pi}{2\omega_n} \tag{12}$$

여기서  $\omega_n$ 은 밸브의 고유진동수이다. 본 연구에서 밸브 폐쇄시간은 이상 P-V에서 얻어진 밸브의 개방된 기간과 비교한다. 식 (11)에서 밸브 충격속도는 밸브의 고유진동수와 밸브의 굽힘거리의 함수이다.

$$v_{imp} = \omega_n \delta \tag{13}$$

무차원화된 결과로부터 각 기준값이 1이거나 1보다 작으면 밸브설계는 만족된다고 볼 수 있다. 또한 1보다 큰 기준값은 설계조건을 위반한 것으로 간주한다.

#### 4. 전문가 시스템의 개요

압축기 밸브 설계시스템을 개발하기 위한 전문가 시스템의 기능을 효율적으로 만들기 위하여 전문가 시스템의 범위를 밸브 설계에 필요한 지식베이스 규모에 맞도록 제한시켰다. 다른 기능들은 독립된 프로그램으로 만들어졌고 이들 기능들은 밸브 설계시스템과 결합하여 사용한다. 여

기에는 압축기 성능 모사 프로그램, 그래픽 루틴 그리고 가스 매니폴드 해석과 설계 프로그램 등도 밸브 설계시스템과 같이 사용할 수 있다.

종래의 설계과정에서 설계자에 의한 판단은 일반적으로 여러 종류의 정보에 기초하여 이루어진다. 이들 정보의 일부는 해석 결과에 의해 만들 수도 있고 또 다른 정보들은 설계자의 경험과 경험법칙에 의하여 만들 수 있다. 본 연구에서는 밸브 설계에 이들 결정요인들은 가능한 한 많은 해석적인 정보로부터 사용하도록 유도하였다. 또한 설계의 성능을 향상시키기 위한 제안들은 설계변수들과 성능을 나타내는 기준들 사이의 관계에서 얻어진 지식을 사용할 수 있도록 만들었다.

Fig.2는 전문가 시스템의 기본구조를 보여준다. Fig.2에서 보는 것과 같이 전문가 시스템은 4가지의 중요성분으로 구성된다<sup>6),7)</sup>. 입·출력 장치(input/output facility), 지식 획득(knowledge acquisition), 지식 베이스(knowledge base) 그리고 추론기관(inference engine). 입·출력 장치는 사용자에 의한 입력을 취급하고 설계 중에 나타나는 시스템의 판단과정과 시스템에 의해 나타나는 설계 상태를 관찰한다. 또한 사용자를 위하여 중간 결과나 최종 결론을 기록하고 그러한 결론이 어떻게 얻어졌는가를 설명해 주고 또한 그 이유를 설명해 준다. 출력 부분은 보고서 파일형태로 만들어지는데 여기에는 선택되어진 밸브 설계모델에 대한 문제점의 진단과 이를 해결하기 위한 제안을 포함한다.

지식 획득은 전문가 시스템을 개발하는데 있어서 없어서는 안될 부분이지만 해결을 원하는 문

제에 대한 지식을 얼마나 이해하고 있는가 또는 전문가 시스템에서 활용할 수 있도록 알고있는 지식을 얼마나 정확하고 완전하게 그리고 일관성 있게 제공할 수 있는가 하는 문제로 인하여 매우 어렵고 논쟁의 여지가 있는 부분이다. 본 연구에서는 지식 획득은 필요한 정보를 밸브 해석 프로그램의 결과로부터 추출한 데이터 파일의 형태와 사용자에 의해 제공된 형태로 전문가 시스템에 제공한다.

규칙베이스라고도 불리는 지식 베이스는 밸브 설계에 대한 지식의 획득과 표현을 위한 것이다. 전문가 시스템에서의 지식 베이스는 사실부분과 규칙부분을 포함한다. 사실부분은 규칙에 포함된 처리를 위한 기초로 사용한다. 규칙부분은 IF-THEN 구문의 형태로 표현한다. 즉

IF “전제 (premise)”,  
THEN “결론 (conclusion)”

규칙의 전제 또는 IF 부분은 많은 조건들로 구성할 수 있고 그리고 결론 또는 THEN 부분은 여러 가지 처리를 표현할 수 있다. 규칙에 대한 판단은 IF 부분과 시스템에 주어진 설명에 대한 사실을 비교하여 할 수 있고 또는 다른 THEN 부분에 있는 중간결론에 의해서 할 수도 있다. IF 부분의 내용이 시스템에 주어진 사실과 일치하면 시스템은 THEN 부분에 있는 결론 내용을 실행하게된다. 예를 들면 만일 마하 수가 설계에서 고려한 허용값 또는 추천값보다 크게 계산되면 다음과 같이 Rule 1이 실행된다.

Rule 1 : IF  $[M] > 1$   
THEN *Mach number is high*

그러므로 Rule 1의 THEN 부분의 내용을 IF 부분이 되는 다른 모든 규칙들이 다음 단계에서 연속적으로 실행된다.

Rule 2 : IF *Mach number is high*  
THEN *Effective flow area is too low*

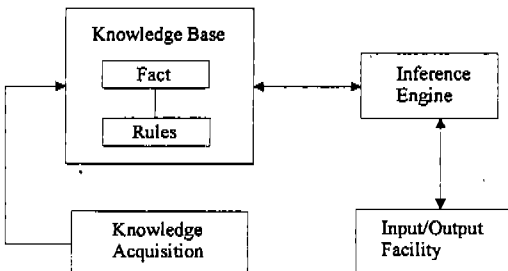


Fig.2 Architecture of an expert system

Rule 2의 THEN 부분의 실행은 연쇄적인 작용을 일으킨다. 즉, Rule 3와 4가 다음과 같이 주어진다.

Rule 3 : IF *Effective flow area is too low*  
 AND  $[A_v] < [A_{v, req}]$   
 THEN *Exit area due to valve deflection is too low*

Rule 4 : IF *Exit area due to valve deflection is too low*  
 THEN *Reduce valve width*  
 AND *Reduce valve thickness*  
 AND *Increase valve length*

이들 규칙은 연속적으로 실행되고 마지막에는 최종 결과에 도달한다. Rule 4에서 얻은 최종결론을 보면 IF 부분에서 밸브의 굽힘 거리가 너무 작기 때문에 마하 수가 높음을 알 수 있다. 또 이들 IF 부분의 문제를 치유하기 위해 THEN 부분에는 여러 가지 제안들을 제시하였다. 마찬가지로 모든 가능한 결론들을 시스템내의 많은 규칙들에 의한 연쇄적인 작용에 의해 얻을 수 있다. 이러한 결론을 얻기 위하여 규칙들의 연관성을 찾는 과정이 사용되는데 이를 추론기관이라 정의한다. 본 연구에서는 전향연쇄기법(forward chaining strategy)을 추론기관으로 사용하였다. 추론기관이 갖고있는 방법들과 그들이 어떻게 사용되어 지는가 하는 것은 참고<sup>9)</sup>에서 찾아볼 수 있다.

5. 민감도 해석

설계에 필요한 규칙은 설계변수와 성능함수 사이의 관계에 기초해서 만들 수 있다. 이들의 관계를 알기 위하여 앞에서 언급한 설계변수에 대한 5가지 성능함수의 민감도에 대한 광범위한 해석이 이루어 졌다. 민감도 해석 결과들은 Table 1과 2에서 보여준다. Table 1은 단순 지지보 형태의 밸브에 대한 결과이고 Table 2는 외팔보 형태의 밸브에 대한 결과를 나타낸다.

Table 1 Sensitivity(Both end simply supported type valve)

\* Change of the performance parameters according to the positive change of the design variables

Inactive case

	$\delta$	$t_c$	M	$\sigma_{inf}$	$\sigma_b$	$V_{imp}$
D	R	X	R	I	R	R
L	I	I	R	X	R	R
W	R	X	I	X	R	R
t	R	R	I	R	R	R

Active case

	$\delta$	$t_c$	M	$\sigma_{inf}$	$\sigma_b$	$V_{imp}$
D	R	X	R	I	X	X
L	I	I	X	X	R	R
W	R	X	X	X	X	X
t	R	R	X	R	I	I
h	I	X	R	X	I	I

Table 2 Sensitivity(Cantilever type valve)

Inactive case

	$\delta$	$t_c$	M	$\sigma_{inf}$	$\sigma_b$	$V_{imp}$
D	R	X	R	I	R	R
L	X	I	X	X	X	R
W	R	X	I	X	R	R
t	R	R	I	R	R	R
Lp	I	X	R	X	I, R	I

Active case

	$\delta$	$t_c$	M	$\sigma_{inf}$	$\sigma_b$	$V_{imp}$
D	R	X	R	I	X	X
L	X	I	X	X	X	R
W	R	X	X	X	X	X
t	R	R	X	R	I	I
Lp	I	X	X	X	R	X
h	I	X	R	X	I	I

D, L, W, t are port diameter, valve length, width, thickness and h is stopper height  
 Lp is valve length up to flow force  
 R:reduced, I:increased, X:no change

밸브 시스템 내에서는 밸브 제지기의 필요성이 존재하는데 이는 한계를 초월한 유동력으로 인하여 밸브 굽힘이 너무 커서 밸브가 유동방향으로 완전히 휘어져 파손되는 것을 방지하고 적절한 밸브의 굽힘을 제공하기 위해 필요한 것이다. 설계변수와 성능함수사이의 민감도 관계는 밸브 제지기가 능동적인지 수동적인지에 따라서 서로 다른 결과를 보여 주기도 한다. 여기서 능동적이라는 함은 밸브가 충분히 굽힘이 일어나서 밸브 제지기에 접촉 하는 것을 의미하고 수동적이라는 함은 밸브가 제지기에 접촉하지 않는 것을 의미한다. Table 1과 2에서 나타난 바와 같이 특히 밸브의 굽힘용력( $\sigma_b$ )과 충돌속도( $v_{imp}$ )는 밸브가 능동적인지 수동적인지에 따라서 설계변수인 밸브 두께에 대해 민감도 해석결과가 서로 상반된 결과를 갖게된다. 다른 현상은 밸브가 수동적일 경우 설계변수와 성능함수가 여러 가지 중간변수들로 인하여 비선형으로 연결되어 있으므로 밸브 길이가 증가함에 따라 굽힘용력은 증가할 수도 있고 감소할 수도 있다. 다른 성능함수들은 밸브 두께의 변화에 따라 밸브가 능동적이거나 수동적이거나에 상관없이 일정한 변화를 보여준다.

그러므로 압축기 밸브설계에 전문가 시스템 개념을 적용하기 위해서 밸브 제지기의 영향이 고려되어야 한다. Fig.3은 밸브 제지기가 설계 변수의 상태에 어떻게 영향을 미치는가를 보여준다. Fig.3에서 밸브 제지기가 있는 경우는 8가지

경우로 분류가 되고 제지기가 없는 경우는 3가지로 분류가 된다. 이들 경우들은 밸브의 굽힘 거리와 밸브의 기준 굽힘거리와의 관계 또 밸브 제지기의 높이와의 관계를 보여준다. 밸브 제지기의 이상높이는 식 (2)에서 구할 수 있다. 밸브 제지기의 실제높이와 이상높이와의 관계는 전문가 시스템의 개발에 매우 중요한 역할을 한다.

전문가 시스템에서는 어떤 규칙을 먼저 실행할지를 결정하기 위하여 밸브 제지기의 존재 여부를 먼저 확인한다. 만일 밸브 제지기가 존재하면 제지기의 설정 높이가 적당한지를 확인한다. 만일 제지기가 존재하지 않는다면 밸브의 굽힘 거리가 불필요하게 많이 굽혀졌는지를 확인하게 된다. 그리고 난후 시스템은 너무 큰 굽힘 거리를 만들지 않고 적당한 유동면적을 제공할 수 있는 밸브의 적당한 굽힘 거리 즉 기준 굽힘 거리를 찾는다. 이 기준 굽힘 거리와 밸브 제지기의 높이를 비교해서 제지기의 높이가 Fig.3에서 나타난 것과 같이 3가지로 분류를 하게된다.

- i )  $h > h_{def} \rightarrow h$  is high
- ii )  $h = h_{def} \rightarrow h$  is fine
- iii )  $h < h_{def} \rightarrow h$  is low

밸브 제지기가 너무 높고 또 밸브의 굽힘 거리가 필요이상으로 클 때 전문가 시스템내의 규칙 베이스에 의해 다음과 같은 진단을 할 수 있다.

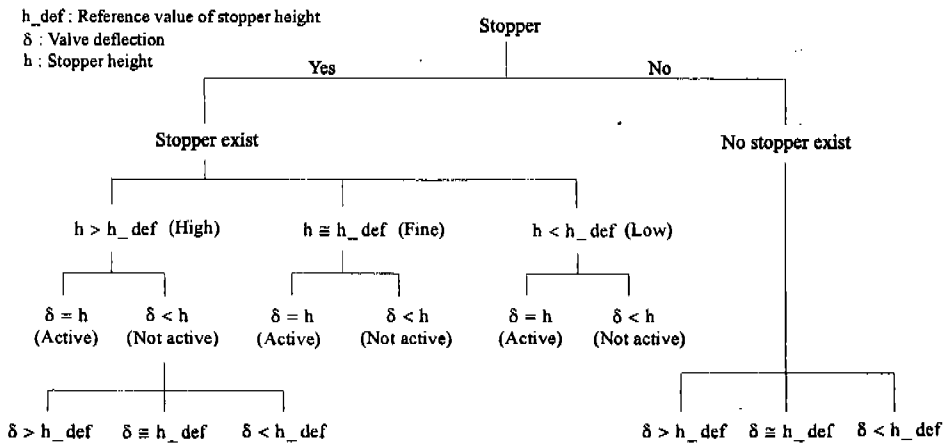


Fig.3 Diagram of the effects of stopper height

Stopper exists  $\rightarrow h > h_{def}(high)$   
 $\rightarrow \delta < h(not\ active) \rightarrow \delta > h_{def}$

그러므로 전문가 시스템은 밸브 설계에서 다음과 같은 진단을 유추할 수 있다.

- 1) 밸브 제지기가 존재한다.
- 2) 밸브 제지기의 높이가 너무 높다.
- 3) 밸브 제지기는 수동적이다. 즉 제지기 높이는 밸브 굽힘 거리에 비해 너무 크다.
- 4) 밸브 굽힘 거리가 너무 크다.

규칙베이스 내에서 위의 진단과 관계되는 부분들은 성능함수들이 평가되기 전에 미리 실행된다. 다음 레벨의 규칙베이스에서 전문가 시스템은 5가지 성능함수 또는 설계기준들에 기초해 설계를 진단하고 진단에 따른 필요한 처방을 제안한다. 위의 경우에는 3가지의 가능한 제안을 할 수 있다. 이들은 다음과 같다.

- 1) 밸브 제지의 높이(h)를 감소하라.
- 2) 밸브 굽힘 거리( $\delta$ )를 감소하라.
- 3) 밸브 굽힘 거리를 증가하다.

이들 3가지 제안을 실행하기 위해서는 설계변수로 나타내는 구체적인 제안이 필요하다. 즉 밸브 굽힘 거리를 감소시키기 위해서 어떤 설계변수를 변화시켜야 하는가를 알아야 한다. 이들 관계들은 전문가 시스템내의 규칙베이스에서 유추할 수 있다.

앞에서 언급한 3가지 제안중 2가지 제안은 서로 상반된다. 이러한 경우는 가능한 모든 제안을 고려한 후 확실하게 고려할 필요가 없는 조건들을 하나씩 제거함으로써 설계영역을 감소하게 함으로서 나타나는 경우이다. 진단과 처방을 위한 전문가 시스템내의 규칙베이스는 설계변수와 성능함수사이의 변수관계에 기초하여 약 660여개의 규칙들로 구성되었다.

전문가 시스템은 규칙베이스에 의해 처방뿐만 아니라 설계변수들에 대한 민감도 결과인 산술적인 수치도 제공한다. 특히 설계변수와 성능함수의 관계가 비선형으로 연결되므로 설계변수를 10% 변화했을 때 그 변화에 대한 설계기준의 변화량을 계산하고 그 결과를 전문가 시스템의 처방부분에 추가하였다. 설계지는 10% 변화에

대한 민감도 결과들을 참고하여 선택되었던 설계모델의 설계조건을 만족시키기 위하여 설계변수를 얼마만큼 변화시켜야 하는지를 평가할 수 있고 또 이로 인하여 반복적인 설계횟수를 크게 줄일 수 있다.

6. 적용 예 및 고찰

Fig.4는 왕복형 피스톤압축기의 예를 보여준다. 밸브 시스템은 원형포트와 밸브 폭이 일정한 외팔보를 모델로 한다. Fig.1은 일정한 밸브 폭을 갖는 외팔보를 보여준다. 그림에서 보여준 배출면의 포트와 밸브의 설계변수들에 대한 초기치수들은 다음과 같다. 포트의 직경  $D=2.6mm$ , 밸브의 길이  $L=15.7mm$ ,  $L_p=10.7mm$ , 밸브 폭  $W=13.0mm$  그리고 밸브두께  $t=0.15mm$ 이다. 이들 초기 설계변수들과 압축기 작동에 필요한 여러 가지 기본조건들을 사용한 밸브 설계시

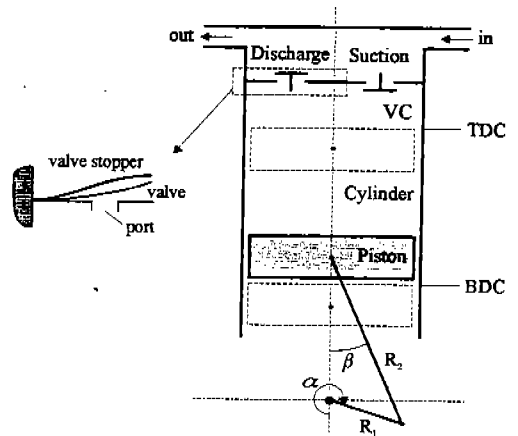


Fig.4 Reciprocating compressor mechanism (Connecting Rod Type)

Table 3 Analysis results of the discharge side

Design	Stop	M	$t_c$	$\sigma_{inf}$	$\sigma_b$	$v_{imp}$
(2, 2)	1.00	2.10	2.95	0.16	0.99	0.62
(4, 4)	0.85	1.02	2.65	0.42	0.86	0.59

(\* , \*) is (port, valve)



시스템의 해석부분에 의하여 초기설계의 성능에 대한 결과를 얻었다. 이 결과들은 Table 3에서 보여준다. 여기서 1보다 큰 값들은 기준치를 초과한 것으로 간주한다.

Table 3에서 포트/밸브 설계 (2, 2)는 포트와 밸브에 대한 초기설계이다. 초기설계에 대한 해석결과는 설계의 문제점들에 대한 진단과 그 문제점들의 치유를 위한 제안을 나타내는 보고서 파일을 만들기 위해 전문가 시스템에 의해 평가된다. 전문가 시스템에 의한 평가결과 즉 진단과 제안을 나타내는 보고서 파일은 Fig.5에서 보여준다. 보고서 파일은 2가지의 수준으로 만들어진다. 첫 번째 수준의 보고서는 다른 설계기준들에 대한 영향을 고려하지 않고 오직 기준 값을 초과

한 설계기준들을 향상시키기 위한 제안을 포함한다. 따라서 이러한 제안방법은 다른 설계기준에 대한 제안과 자주 상반되는 제안을 만들 수 있다. 그러나 각 설계기준을 향상시키기 위하여 어떤 제안들이 필요한가를 알기 위해서는 앞에서 나온 제안방법도 필요하다. 두 번째 수준의 보고서에서는 이러한 상반된 제안들이 배제되었다. 여기에서 보여준 제안들을 사용하면 다른 설계기준들에 부정적인 영향을 주지 않고 기준치를 초과한 설계기준들을 향상시킬 수 있다.

Table 3에서 보여준 초기설계 (2, 2)에서는 2가지의 설계기준이 기준치를 초과하였다. 이들 기준은 유동 마하 수와 밸브 개폐시간 이다. 이들을 향상시키기 위해 Fig.5로부터 2가지 제안

***** REPORT OF THE ANALYSIS RESULT USING EXPERT SYSTEM *****	
*** RECIPROCATING PISTON TYPE COMPRESSOR (CONNECTING ROD TYPE) ***	
* The Selected Port/Valve System of the Compressor is : THE PORT/VALVE PAIR (2,2) IS ON THE DISCHARGE SIDE	and exit area due to valve deflection (A1)
** THIS IS THE FIRST LEVEL REPORT **	* To increase port area (Ao), i) Increase port size (D) If port size (D) is increased by 10 %, then Mach number will be reduced by 15.41 % ii) Increase number of port
* Valve Closing Time (Tc)	* To increase exit area (A1), There are no suggestions in this case
1) Diagnoses :	* SECOND AND HIGHER LEVEL REPORT *
* Valve closing time is too high (1) Natural frequency (Wn) is too low	* Valve Closing Time and Mach Number
2) Suggestions :	1) Diagnoses :
To improve (1), increase natural frequency (Wn) To do that, i) Reduce valve stopper height (H) ii) Reduce valve length (L) If valve length (L) is reduced by 10 %, then closing time will be reduced by 18.99 % iii) Increase valve thickness (t) If valve thickness (t) is increased by 10 %, then closing time will be reduced by 9.09 %	* Valve closing time is too high & Mach number is too high i.e., Valve closing time is too high & Port area (Ao) and Exit area (A1) are too low
* Mach Number (M)	2) Suggestions :
1) Diagnoses :	i) Reduce valve length (L) (Cantilever) * If valve length (L) is reduced by 10 %, then closing time will be reduced by 18.99% ii) Increase port size (D) * If port size (D) is increased by 10 %, then Mach number will be reduced by 15.41 % iii) Increase number of port
* Mach number is too high (1) Flow velocity is too high (1.1) Effective flow area is too low (1.1.1) Port area(Ao) and Exit area due to valve deflection (A1) are too low	** END OF DIAGNOSES AND SUGGESTIONS **
2) Suggestions :	
* To improve (1.1.1), increase port area (Ao)	

Fig.5 Report file of discharge side (Reciprocating Piston)

을 사용하였다. 사용한 제안은 밸브 개폐시간의 향상을 위한 밸브 길이의 감소와 유동 마하 수의 향상을 위한 포트 직경의 증가이다. 이들 제안을 선택한 이유는 이들의 민감도가 두 성능변수를 향상시키는데 가장 민감한 효과를 갖고 있기 때문이다. 이들을 사용하여 밸브 해석 부분에서 재해석을 행한 결과 새로운 설계 (4, 4)가 얻어졌고 그 결과가 Table 3에 보여준다. 비록 여기서도 2가지 성능함수가 기준치를 초과하였지만 유동 마하수는 2.1에서 1.02로 감소하였고 밸브 개폐시간도 2.95에서 2.65로 감소하였다. 또한 변화된 설계변수의 치수는  $D=4.2\text{mm}$ 와  $L=14.9\text{mm}$ 이고 나머지 변수는 변화가 없다. 여기서는 더 이상의 반복 없이 새롭게 얻은 포트/밸브 설계 (4, 4)를 최종설계로 정의하였다. 그러나 실제설계에서는 새로운 설계결과를 전문가 시스템에서 재평가하여 모든 기준치를 만족하는 설계를 얻거나 또는 설계자가 원하는 설계를 얻을 때까지 반복적인 설계과정을 거쳐게 된다.

## 7. 결 론

왕복형 및 회전형 피스톤 압축기 밸브 시스템의 해석과 설계를 위하여 규칙베이스를 사용한 전문가 시스템이 개발되었다. 압축기의 신뢰성과 성능을 평가하기 위하여 설계기준이 되는 5가지 성능변수들을 사용하였다. 규칙베이스 부분을 확립하기 위하여 밸브 제지기의 영향을 포함한 여러 가지 변수들에 대한 연구가 행하여졌다. 전문가 시스템부분은 진단과 처방의 2가지 부분으로 구성되어 있다. 진단부분은 밸브 설계시 밸브 시스템 내에서 나타날 수 있는 문제를 검증하고 처방 부분에서는 그 문제점들을 해결하기 위한 제안을 제공해 준다. 변수들에 대한 민감도가 설계과정에서의 반복횟수를 줄이고 설계자의 판단능력을 도와주기 위해 제공되었다. 밸브설계 시스템을 위한 전문가 시스템을 적절하게 활용한다면 더 짧은 시간에 적은 횟수의 반복으로 신뢰도와 성능이 좋은 밸브의 설계를 얻는데 큰 도움이 될 것이다.

## 참 고 문 헌

1. W. Soedel, "Design and Mechanics of Compressor Valves", Short Course Note, Purdue University, West Lafayette, IN, 1984.
2. W. Soedel, "Introduction to Computer Simulation of Positive Displacement Type Compressor", Short Course Note, Purdue University, West Lafayette, IN, 1972.
3. Durkin John, "*Expert System: Design and Development*", Macmillan Publishing Co., 1994.
4. D. D. Schwerzler and J. F. Hamilton, "An Analytical Method for Determining Effective Flow and Force Areas for Refrigeration Compressor Valvein Systems", Proceedings of the 1972 Purdue Compressor Technology Conference, pp. 30~36, 1972.
5. J. S. Arora and G. Baenziger, "Uses of Artificial Intelligence in Design Optimization", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 54, North-Holland, pp. 303~323, 1986.
6. D. A. Waterman, "*A Guide to Expert Systems*", Addison-Wesley, 1986.
7. F. Hayes-Roth, D. A. Waterman, and D. B. Lenat, eds., "*Building Expert System*", Addison-Wesley, 1983.
8. J. R. Dixon, "Artificial Intelligence and Design: A Mechanical Engineering View", Proceeding AAAI-86, 5th National Conference on AI, pp. 872~877, 1986.
9. S. Akagi and K. Fujita, "Building An Expert System for Engineering Design Based in the Object-Oriented Knowledge Representation Concept", ASME, J. pf Mechanical Design, Vol. 12, pp. 215~222, June 1990.
10. A. Kissil and H. A. Kamel, "An Expert

- System Finite Element Modular”, Application of Artificial Intelligence in Engineering Problems, 1st Int. Conf., Springer-Verlag, Vol. II, pp. 1179~1186, April 1986.
11. R. H. Allen, “Design Guidelines for Expert Systems”, Application of Artificial Intelligence in Engineering Problems, 1st Int. Conf., Springer-Verlag, Vol. I, pp. 651~658, April 1986.
  12. Howe, A., and Cohen, P., 1986, “Dominic: A Domain-Independent Program for Mechanical Engineering Design”, Application of Artificial Intelligence in Engineering Problems, 1st Int. Conf., Springer-Verlag, Vol. I, April, pp. 289~299.
  13. Mayer, A. K., and Lu, S. C-Y., 1988, “An AI-Based Approach for the Integration of Multiple Sources of Knowledge to Aid Engineering Design”, ASME, J. of Mechanisms, Transmissions, and Automation in Design, Vol. 110, September, pp. 316~323.
  14. Soedel, W., 1974, “On Dynamic Stresses in Compressor Valve Reeds or Plates During Colinear Impact on Valve Seats”, Proceedings of the 1974 Purdue Compressor Technology Conference, pp. 319~328.