

研究論文

## CO<sub>2</sub>레이저 절단을 위한 전문가 시스템 개발에 관한 연구

최은석\* · 한국찬\*\* · 나석주\*\*

### A Study on the Development of an Expert System for CO<sub>2</sub> Laser Cutting

E.S. Choi\*, G.C. Han\*\* and S.J. Na\*\*

**Key Words** : CO<sub>2</sub> Laser Cutting(CO<sub>2</sub> 레이저 절단), Expert System(전문가 시스템), Cutting Quality(절단 품질), Optimum Condition(최적조건), Qualitative Inference(정성적 추론)

#### Abstract

Laser cutting is experiencing a rising worldwide acceptance in the industry. Expert systems are necessary for the systematic arrangement and searching of experimental data existing in journal papers, job handbooks, etc..

This paper proposes an expert system for the selection of the appropriate laser cutting variables from the available database. Optimum cutting conditions according to the given cutting velocity were searched and qualitative comments which are difficult to be used as database variables were shown at each velocity using the binary and fuzzy inference. These comments could be informative to unskilled operators of the laser cutting process. Typical cutting conditions of the mild steel and stainless steel were included and the working range and quality variations were displayed graphically. The proposed algorithm was implemented in an IBM compatible personal computer as an expert system for CO<sub>2</sub> laser cutting to derive the optimum cutting conditions by using the turbo prolog.

\* 비회원, 대우 자동차(주)

\*\* 정회원, 한국과학기술원 정밀공학과

## 1. 서 론

### 1.1. 연구 배경

1960년대에 레이저가 처음 출현한 이래, 레이저가 갖는 고강도(high intensity), 응집성(coherence), 단 일파장성(monochromaticity)과 조정성(tunability)에 의해 레이저 가공은 다른 가공에 비해 경쟁력이 있는 공정이 되었다. 그 중 레이저 절단은 산업용에 이용되는 레이저 공정중에서 50-80%를 차지하고 있다<sup>1)</sup>. 매년 많은 논문, 실험 데이터, 작업 사양이 각 실험실, 작업장에서 나오지만 체계화된 데이터 베이스의 형태로 다른 사용자에게 제공되지 않기 때문에 사장이 되거나 같은 실험을 반복해야하는 등 경제적 손실이 큰 상황이다. 따라서 인공지능의 한 분야인 전문가 시스템에 의한 실험결과와 지식 베이스화가 절실하며 최근에 이에 관한 연구가 활발하다. 전문가 시스템은 인공지능의 한 분야로서 이에대한 연구가 활발하게 논의 되고 있으며<sup>2)</sup>, 이에 대한 정확한 정의는 아직 까지 논의 중에 있으나, 일반적인 정의로는 어떤 특정분야에 있어 그 방면의 전문가들이 가진 전문지식을 정해진 규칙에 따라 컴퓨터 내에 기억시켜 두고서, 비전문가인 일반 사용자의 질문에 대해 인간 전문가가 취하는 사고 방식을 모방하여 전문 지식을 요약해주거나 지적인 조언 또는 의사 결정을 해주도록 되어 있는 일종의 컴퓨터 프로그램이라 말할 수 있다<sup>3)</sup>. 근래에 들어와서는 고전적인 이진논리를 사용해 추론을 해주던 종래의 전문가 시스템의 한계를 벗어나기 위해 불확실성이나 애매함을 포함한 전문가의 지식이나 사용되는 용어들을 퍼지 논리를 써서 표현하는 퍼지 전문가 시스템의 개발이 연구되었고 실제적인 시스템도 개발 되었다. 그러나 아직까지 레이저 절단에 대한 전문가 시스템의 구축 현황은 단지 제한된 데이터 베이스 탐색 수준에 머물고 있으며 실제 현장에 적용하여 절단 품질을 보증할 만한 성공적인 연구결과가 아직까지 국내외를 막론하고 드문 실정이다.

### 1.2. 연구의 목적 및 범위

본 논문에서는 레이저 절단용 데이터베이스를 구축하는 방법과 데이터베이스를 탐색하여 수치로 표

현하는 작업 조건을 제시하고 이진 논리(binary logic)와 퍼지 논리(fuzzy logic)를 사용한 정성적 추론에 의해 정성적인 작업조건을 제시하여 작업자의 작업을 도울 수 있는 전문가 시스템의 개발에 관해 기술하였다. 본 논문에서는 일반적으로 생산 현장에서 실제 쓰이는 조건을 기준으로 데이터베이스를 구축하였으며 특수한 작업조건등은 취급하지 않았다. 시스템을 구성하는데 있어서 레이저 절단에 관한 여러가지 전문가적 지식은 관련 전문가의 조언과 레이저 절단에 관해 쓰여진 기존의 논문을 비롯한 참고 서적과 실험을 통하여 얻었다. 레이저 절단 전문가 시스템은 실험 결과를 체계적으로 정리한 데이터베이스 부분, 데이터 베이스를 탐색하며 정성적 추론을 제시해주는 추론기관, 추론 결과를 사용자에게 제시하는 사용자 인터페이스로 구성되어 있다. 본 논문에서는 데이터 베이스 탐색, 정성적 추론을 제시하는 방법에 주력하였다.

## 2. 레이저 절단 공정

### 2.1. 레이저 절단 원리

레이저 절단 공정은 집중된 열원을 모재에 조사하여 절단경로의 전단부(leading edge)를 형성하고, 고압의 보조가스로 녹은 모재를 제거하여 이루어진다. 레이저 절단은 모재로부터 용융물을 제거하는 방식에 따라 크게 승화절단, 용융절단 및 연소절단의 세 분야로 나뉜다<sup>4)</sup>. 특히 연소 절단 공정에서는 산화반응의 반응열이 모재의 용융에 이용됨으로, 용융절단에 비해 속도가 6배 정도까지 빠를수 있고 절단할 수 있는 두께도 커서 경제적이다. 본 논문에서는 경제성이 뛰어나며 금속의 레이저 절단에 주로 쓰이는 연소 절단으로 그 범위를 국한시켰으며 차후 데이터 베이스의 확장에 따라 그 적용 범위도 넓혀질 수 있으리라 기대한다.

### 2.2. 레이저 절단 변수

레이저 절단 가공시 절단성에 영향을 주는 변수는 Fig.1과 같이 분류할 수 있으며 하드웨어적인 변수와 소프트웨어적인 변수로 대별될 수 있다. 대부분의 변수는 레이저 가공기 특성에 의해 결정되며, 생산

LASER SYSTEM	BEAM DELIVERY	SYSTEM STIFFNESS	CONTROL LABILITY	CUTTING QUALITY
Power	Focal length	Beam stability	Displacement accuracy	
Beam mode	Focal radius	Table vibration	Laser response	
Power stability	Focal point	Table stiffness	Table response	
Power range				
Alignment between nozzle and beam		Absorptivity	Dimensional accuracy	
Nozzle-workpiece distance	Stability	Roughness	Distortion	
Nozzle hole type	Number of axis	Thickness	Heat affected zone	
Gas pressure, flow rate	Velocity range	Material	Kerf-width	
Gas type			Roughness	
ASSIST GAS	SPEED	WORKPIECE CONDITION	Dross	
			Piercing time	

Fig.1 Laser cutting variables and cutting qualities

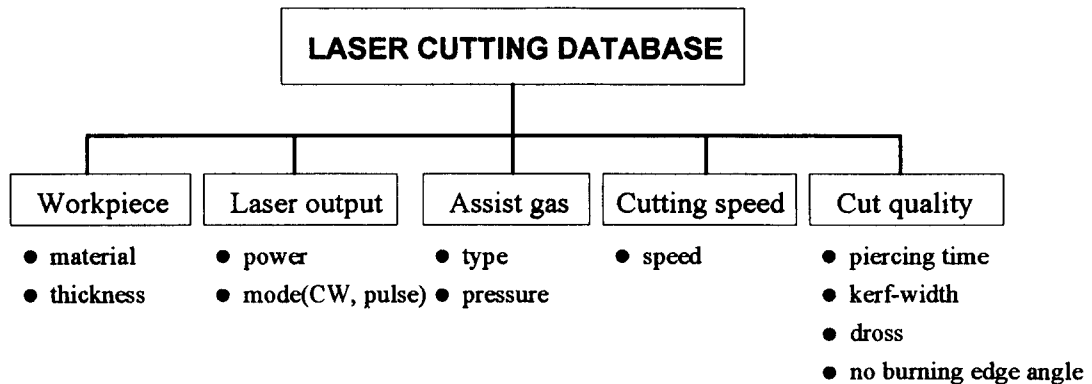


Fig.2 Laser cutting database variables

현장에서 작업자가 제어할 수 있는 변수는 한정된다. 일반적으로 절단 품질에 영향을 미치는 변수의 종류가 많을 뿐만 아니라 이들은 상호 연관을 갖고 있기 때문에 최적의 절단 결과를 얻기 위한 절단 조건의 선정은 매우 어려운 문제이다. 본 논문에서는 일반적인 레이저 가공기를 대상으로 했기 때문에 레이저 빔 모드(*beam mode*), 빔 직경(*beam radius*), 빔 스폿 직경(*beam focal radius*), 가공 테이블 및 CNC 시스템의 정밀도와 같은 레이저 가공기에 의해 결정되는 변수들은 데이터 베이스화 하지 않았다. 데이터 베이스의 변수로 선정된 절단 변수는 생산 현장에서 작업자가 제어할 수 있는 변수들 중에서 정량적인 변수이며, 사용자가 다룰 수 있는 정성적인 변수는 코멘트(*comment*) 형태로 제시하였다. 지식 베이스에서 변수로 설정한 레이저 절단 변수는 Fig.2에 있다.

### 3. 퍼지 전문가 시스템

#### 3.1. 퍼지 전문가 시스템 개요

전문가 시스템은 전문가의 지식을 지식베이스의 형태로 저장하여 사용자가 원하는 정보를 추론해내는 지식 기반 시스템이다. 기존의 많은 전문가 시스템은 컴퓨터가 기본적으로 제공하는 이진 논리에 그 기반을 두고 있기 때문에 실제적으로 이진 논리의 제한성에 의해 전문가의 지식을 효과적으로 표현하지 못하는 어려움이 있다. 전문가의 지식에는 지식을 표현하는 용어자체에 애매함이 포함될 수 있고, 명제의 진위가 불확실한 경우가 일반적이기 때문에 이러한 애매함과 불확실성을 타당하게 처리할 수 있는 방법이 필요하다. 1965년 Zadeh에 의해 제안된 퍼지 집합론은 불확실하고 경계가 애매한 개념을 정량적으로 처리할 수 있는 기틀을 제공하였다. 이에 많은 연구자들이 퍼지 집합론을 전문가 시스템에 적용하는 연구를 수행하였고 실제적인 시스템도 개발되었다<sup>5)</sup>.

#### 3.2 퍼지 전문가 시스템의 구현

전문가 시스템은 지식베이스(*knowledge base*), 추론 기관(*inference engine*), 사용자 인터페이스(*user interface*)의 세가지 요소로 구성되어 기존의 절차적

혹은 알고리즘 제어적인 프로그램과는 달리 선언된 결론에 부합하는 조건을 찾아서 추론 엔진이 자동적으로 지식 베이스를 탐색 하게된다. 또한 추론엔진부와 지식 베이스가 서로 독립적이어서 확장 및 변동이 용이하며, 전문가의 경험적 지식을 선택적으로 이용하게 된다.

##### 3.2.1. 지식베이스

지식베이스는 어떤 주제에 대한 상세한 지식을 유지하는 데이터 베이스의 발전된 형태이다. 지식은 문제를 해결하기 위해서 사용되며 적용하고자 하는 분야에 따라 적절한 지식표현 방법을 선정하는 것은 효율적인 추론을 위해 중요하게 고려되어야 할 문제이다. 주요한 지식 표현 방법에는 관계형 데이터 베이스(*relational database*), 생성규칙(*production rule*), 의미 네트워크(*semantic network*), 프레임 구조(*frame structure*)등이 있다. 본 논문에서는 관계형 데이터 베이스와 생성 규칙을 이용하였는데 그 이유는 실험 데이터를 저장하는데는 관계형 데이터베이스가 효율적이고, 퍼지 추론에서는 퍼지 집합의 연산을 생성규칙의 변형된 형태인 퍼지 생성규칙(*fuzzy production rule*)을 적용하여 추론하는 것이 편리하기 때문이다. 관계형 데이터 베이스는 '관계명칭(속성값1, 속성값2, ...)'의 형태를 가진 튜플(*tuple*)의 집합으로 이루어져 있다. 생성규칙은 전제가 사실이라면 결론도 사실이라는 형태(*if-then-*)로 표현된다. 퍼지 추론에서는 전제를 이루는 변수인 퍼지 집합의 소속 정도(*membership degree*)를 퍼지 연산(*fuzzy operation*)하고 이값을 결론의 소속정도가 되는 퍼지 생성규칙으로 변형된다.

##### 3.2.2. 추론기관

추론 기관은 전문가 시스템의 핵심부로 사람이 문제를 해결하기 위해 취하는 추론과정을 모방하기 위해 두가지 일을 한다<sup>6)</sup>. 첫째는 작업메모리(*working memory*)내에 존재하는 사실(*fact*)과 규칙 베이스(*rule base*)내의 규칙을 조사하고 필요시 새로운 사실을 추가한다. 둘째는 어떤 규칙들이 어떤 순서로 조사되고 불러내어져야 하는지를 결정한다. 추론 기관의 구성요소는 추론 요소(*inference component*)와 제어 요소(*control component*)로 이루어져 있다. 추론 요소는 삼단 논법으로 동작하고, 제어 요소는 어떤

규칙이 적용되어야 하는지를 결정하는데 보통 전진 추론(forward chaining)과 후진 추론(backward chaining)으로 구분된다. 전진추론은 알려진 사실로부터 새로운 사실을 얻어내는 추론이며, 후진 추론은 가설을 설정해 두고 이것이 참인지 거짓인지 판단하기 위해 하위의 탐색을 수행하는 추론이다<sup>7)</sup>. 본 논문에서는 프롤로그 언어 자체에 내장된 패턴 매칭(pattern matching) 및 자동 백트래킹(auto-backtracking)을 이용한 자체 추론 기능을 이용하였다.

### 3.2.3. 사용자 인터페이스(user interface)

사용자 인터페이스는 전문가 시스템과 의사소통을 할 수 있는 수단을 제공하는데 전문가 시스템과 사용자가 더 편리하게 대화할 수 있도록 하기 위해 윈도우, 메뉴방식, 그래픽등을 지원하였다. 전문가 시스템과 사용자간에 이루어지는 대화방식은 사용자가 원하는 문제를 제기하면 시스템이 초기 추론을 위한 데이터의 입력을 사용자에게 요구하고 결론을 도출해주는 형태를 취하였다.

## 3.3. 절단 가능 영역 설정 알고리즘

사용자가 선정한 보조가스, 주어진 보조가스 압력 하에서의 레이저 출력과 절단 속도를 변수로 설정하고 절단 가능 영역을 구했는데 이 절단 가능 영역은 몇개의 레이저 출력 영역에 대해서 절단 가능 속도를 표시한 그래프로 표시된다. 사용자가 기능키를 사용하여 절단 영역을 구성하는 각각의 레이저 출력을 선택하면 그 출력에서의 절단 조건, 피어싱 조건과 속도 변화에 따른 절단 품질의 변화를 보여준다. 사용자는 절단하고자 하는 속도에서 최적 조건 뿐만 아니라 절단 영역을 비교해 봄으로써 각 재료의 절단 영역과 속도에 따라 변하는 절단 품질과의 상관관계를 이해할 수 있다. 이 알고리즘은 사용자가 레이저 절단에서 절단조건과 품질 변수와의 상관 관계를 이해할 수 있도록 도와주는 교육적인 부분이다.

## 3.4. 속도별 최적 조건 설정 알고리즘

레이저 절단 조건에서 제일 먼저 정해져야 할 것은 CNC 가공기가 절단하고자 하는 형상의 정밀도를 얻을 수 있는 제한 속도를 정하는 문제이다<sup>8)</sup> 일반

적으로 직선부나 곡률이 큰 원은 빠른 속도로 절단을 행하더라도 기하학적인 정밀도가 얻어지기 때문에 문제가 되지 않으나 곡선부나 작은 예각부는 어떤 속도 이상에서는 정밀도가 제대로 나오지 않아 문제가 된다. 레이저 절단에서는 CNC 가공기의 기하학적 정밀도의 문제외에, 절단부에서 용융물이 유동을 하기 때문에 빠른 속도로 작은 곡률의 형상을 절단하면 표면부에서는 기하학적 정밀도가 얻어진다 하더라도 산화반응에 의해 주로 지배되는 배면부에서는 기하학적 정밀도가 얻어지지 않을 수 있다. 이에 본 논문에서는 속도전체 영역에서 최적조건을 제시하지 않고 저속영역부터 고속영역까지 몇 단계의 속도영역에서 최적조건을 제시하고 사용자가 절단하고자 하는 절단부의 형상의 복잡한 정도에 따라 절단조건을 선정할수 있게 하였다. 본 시스템에서는 절단 품질변수로 선정된 피어싱 타임(piercing time), 절단폭(kerf-width), 드로스(dross), 버닝이 일어나지 않는 최소 예각(no burning edge angle)의 가중치준 합이 최소값을 갖는 조건을 각 속도 영역에서 최적절단 조건으로 잡았다. 다음은 품질 평가 식이다.

$$Q = \sum_{i=1}^n W_{qi} q_i \quad (1)$$

여기서

- $q_i$  : 품질 변수
- $W_{qi}$  : 품질 변수  $q_i$ 의 가중치
- $Q$  : 품질 평가종합 변수

## 3.5. 정성적 추론

전문가의 지식은 수치적으로 나타낼 수 있는 지식도 있지만 수치적으로 나타내기 곤란한 정성적 지식 또한 존재한다. 이러한 정성적인 지식은 데이터 베이스를 보충하여 사용자가 절단조건을 선정할때 전문가가 행하는 것과 같이 정성적인 조건을 맞추어줄 수 있게 하여 최적의 절단 조건을 얻을 수 있게 하였다. 정성적 추론 제시는 본래의 목적인 절단에 필요한 정성적인 조건을 제시하는 기능 이외에, 데이터베이스화 되어 있지 않은 재료의 전형적인 절단 조건을 알려주어 사용자가 시험 절단을 하는데도 도움을 줄 수 있다. 또한 사용자가 데이터 베이스를 확장할 때 여러 절단 조건의 일반적인 변화 범위를 알려줌으로써 새로운 데이터베이스를 쉽고 능률적

Table 1 Rules used for qualitative comments :

	Rule	Applicable material	Rule type
1	Use large diameter nozzle for thick material	M,S each	fuzzy
2	Set nozzle-workpiece distance 1-2mm	M & S	if-then
3	At piercing, 200Hz is recommended as the pulse frequency	M & S	if-then
4	Lower the assist gas pressure to cut thick mild steel with CW	M	fuzzy
5	Raise the assist gas pressure more or less to cut thick mild steel with pule	M	fuzzy
6	Set focal point at +Z to cut thick mild steel with CW	M	fuzzy
7	Set focal point at 0-0.5mm to cut mild steel with pulse	M	if-then
8	Use 5" FL lens to cut material of 3mm and larger thickness	M	if-then
9	Set power between P1 and P2 to cut mild steel with CW P1 = (thickness + velocity - 0.5) × 100    P2 = (thickness + velocity) × 100	M	if-then
10	Cut with pulse if the working velocity is not exceeding 1m/min	M,S each	if-then
11	Set peak frequency at maximum power of system	M&S	if-then
12	Set pulse duty between D1 and D2 calculated by following rule D1 = (thickness + velocity - 0.35) × 100 × (100/max power) D2 = (thickness + velocity - 0.10) × 100 × (100/max power)	M	if-then
13	The kerf-width becomes large with increasing peak power when you cut workpiece with pulse	M&S	if-then
14	Use enhanced pulse when to cut stainless steel	S	if-then
15	The assist gas pressure should be below the working range of lens	S	if-then
16	If you cut 1.5t and thicker stainless steel with CW, you would get a much dross	S	if-then
17	You can reduce dross and HAZ by using N <sub>2</sub> or Ar as assist gas for stainless steel cutting	S	if-then
18	Raise the assist gas pressure to cut thick stainless steel	S	fuzzy
19	Focal point for stainless steel • 2.5" FL lens if $t < 1$ : lower side of plate    if $1 \leq t \leq 3$ : -1 • 5" FL lens if $0 < t \leq 3$ lower side plate	S	if-then

M : mild steel, S : Stainless steel

으로 구축할 수 있게 해준다. 교육적인 측면에서도 정성적인 추론제시는 사용자에게 레이저 절단을 보다 잘 이해할 수 있게 해준다. Table 1에 정성적인 추론을 위해 본 논문에서 사용한 규칙을 나타내었다<sup>8)</sup>. 언제 어떤 규칙을 쓸 것인가 하는 문제가 제기되는데, Fig.3에 정성적 추론에서 적용할 규칙을 찾는 방법을 트리(tree) 형태로 나타내었다. 위와 같은 방법에 의해 사용자에게 제시할 규칙을 정했다면 각각의 규칙을 어떤 형태로 표현할 것인가의 문제가 대두된다. 본 논문에서는 if-then 논리에 의한 추론과 퍼지 집합 이론에 의한 추론을 적용했는데, Table 1에 각각의 규칙이 어떤 방법에 의해 추론되는가를 보여준다. 일부의 규칙은 if-then 논리에 의해 적절히 표현될 수 있지만 일부는 if-then 논리에 의해서는 규칙에 포함되어 있는 불확실성과 애매함을 적절히 표현해낼 수 없기 때문에 불확실성과 애매함을 표현할 수 있는

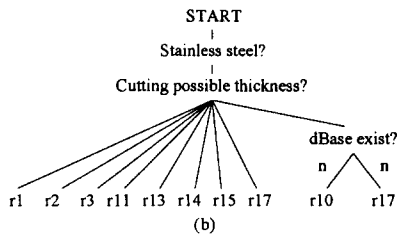
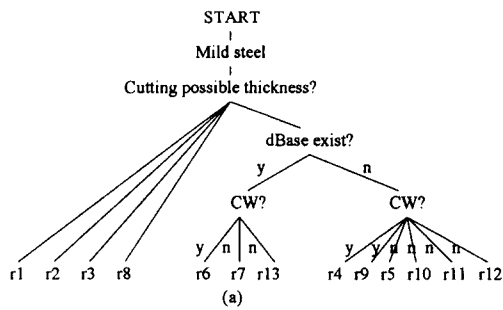
퍼지논리를 도입하였다.

연강에서 펄스 절단(pulse cutting)시 펄스 피크 출력(peak power), 펄스 주파수(pulse frequency), 펄스 듀티(pulse duty)를 추정해주는 추론 규칙 10, 11, 12을 예제로 하여 if-then 논리와 퍼지논리가 실제 정성적인 추론에 어떻게 적용되는지를 다음에서 설명할 수 있다. 규칙10을 살펴보면 연강에서 펄스 절단을 행할 때 펄스 주파수는 두께가 클수록 작아야 하고, 속도가 클수록 커야한다는 생성 규칙(production rule)을 Table 2와 같이 나타낼 수 있다. 여기에서 전제의 언어변수(linguistic variable)로 선정된 재료 두께, 절단 속도는 Fig.4와 같은 퍼지집합으로 표현되는데, 이 그림은 재료 두께, 절단 속도가 주어졌을 때 해당되는 퍼지집합의 소속함수를 구하는 방법을 보이고 있다. 퍼지집합으로 표현되는 두께, 속도를 생성 규칙에 적용하면 해당되는 것은 6, 7, 10, 11로서

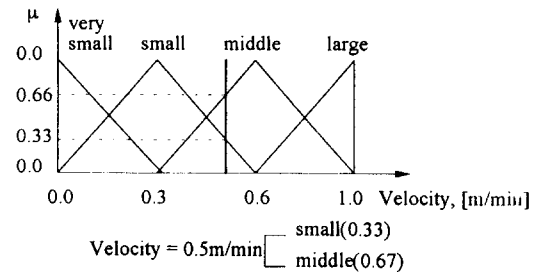
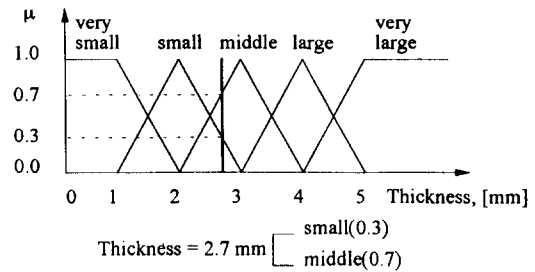
**Table 2** An exmple of fuzzy production rules used for fuzzy inference

	if T is very small	and V is very small	then Fr is middle
2	if T is very small	and V is small	then Fr is large
3	if T is very small	and V is middle	then Fr is large
4	if T is very small	and V is large	then Fr is large
5	if T is small	and V is very small	then Fr is middle
6	if T is small	and V is small	then Fr is middle
7	if T is small	and V is middle	then Fr is large
8	if T is small	and V is large	then Fr is large
9	if T is middle	and V is very small	then Fr is small
10	if T is middle	and V is small	then Fr is middle
11	if T is middle	and V is middle	then Fr is middle
12	if T is middle	and V is large	then Fr is large
13	if T is large	and V is very small	then Fr is small
14	if T is large	and V is small	then Fr is small
15	if T is large	and V is middle	then Fr is middle
16	if T is large	and V is large	then Fr is middle
17	if T is very large	and V is very small	then Fr is very small
18	if T is very large	and V is small	then Fr is small
19	if T is very large	and V is middle	then Fr is small
20	if T is very large	and V is large	then Fr is middle

T : material thickness, V : cutting velocity, Fr : frequency



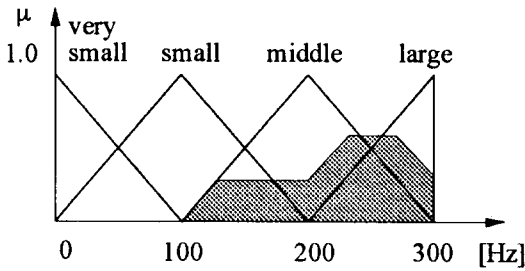
**Fig.3** Tree of rules for qualitative comments :  
(a) mild steel, (b) stainless steel



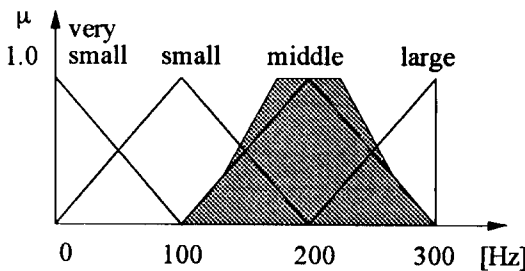
**Fig.4** Fuzzy set for linguistic variable 'thick', 'fast'

Fig.5에 그 생성규칙을 적용한 결과를 보이고 있다. 각각의 생성 규칙에 의한 결과는 퍼지 논리합으로

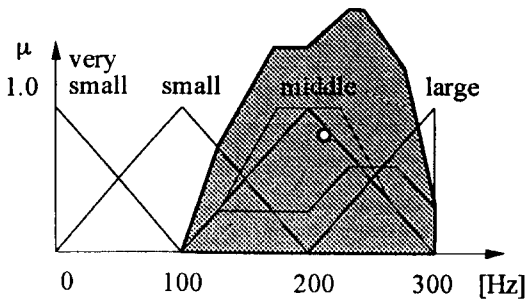
합쳐지고 무게 중심법(center of area method)으로 비퍼지화(defuzzification)가 되어 펄스 주파수를 추



(a) Rule 6 and 7



(b) Rule 10 and 11



(c) Frequency = 207Hz

Fig.5 An example of application of fuzzy rules

론할 수 있다. Fig.4와 Fig.5를 보면 두께 2.7mm, 절단 속도 0.5 m/min로 연강을 절단할 때 규칙 10의 적용은 펄스 주파수 207 Hz를 추천하고 있다. 규칙 11에서 펄스피크출력은 레이저 가공기의 최고 출력으로 한다는 규칙은 펄스 가공시 펄스피크출력을 크게 하는 것이 입열량을 줄일수 있기 때문이며 무조건 생성되는 규칙이다. 규칙 12에서 펄스 듀티는 두께와 속도의 함수로 합법치(rule of thumb)에 의해 구해진다.

## 4. 전문가 시스템 개발 및 적용

### 4.1. 레이저 가공기 사양

레이저 가공기는 700W급 CO<sub>2</sub>레이저 가공기를 대상으로 하였다<sup>9)</sup>.

### 4.2. 전문가 시스템 개발 언어

전문가 시스템을 개발하기 위해서는 크게 나누어 전문가 시스템 개발을 위한 전용 셸(shell)을 이용하는 방법과 프로그래밍언어를 사용하는 방법이 있다. 후자의 경우는 재래식언어와 인공지능 언어를 사용하는 방법이 있으며 근래에 들어와서 퍼지논리를 처리할 수 있는 퍼지 전문가 시스템 개발용 셸, 퍼지 프롤로그(fuzzy prolog), 확장된 리스프(lisp)등이 도입되고 있다. 본 연구에서는 쉽게 구할수 있으면서도 인공지능 언어의 여러 기능을 갖춘 볼랜드사의 터보 프롤로그를 사용하였다.

### 4.3. 개발 프로그램의 전체적 구성 및 기능

레이저 절단 전문가 시스템의 구성은 Fig.6과 같으며 프로그램은 IBM PC/386에서 가동되는 터보프롤로그 버전 2.0으로 작성되었다. 모든 사용자의 입력은 풀다운메뉴 방식에 의하며, 메뉴 선택은 키보드의 핫키(hot key) 혹은 화살표키로 이루어졌다. 메뉴 옵션은 다단계로 구성되어 있고 모듈에 들어가

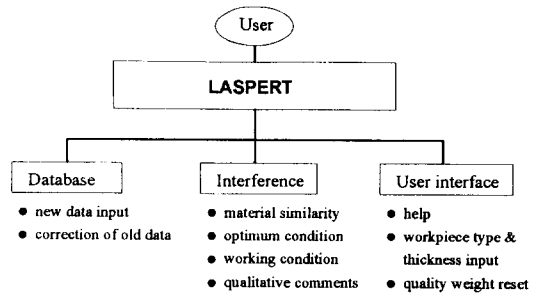


Fig.6 Schematic diagram of developed laser cutting expert system



작업을 끝내고 주 메뉴로 들어갈 때에는 주 메뉴로의 전환 키를 쳐서 주 메뉴로 갈 수 있다. Fig.7에 주요한 기능인 최적 조건을 선정하고 정성적인 추론을 얻는 방법을 순서도로 제시하였다. Fig.8은 속도별 최적 절단 조건을 제시하고 사용자에게 작업조건으로 어떤 속도를 선택할 것인가를 묻는 화면이다. 직선절단부에서는 별 문제가 되지 않으나 형상이 복잡하거나 곡각진 코너부에서는 절단속도를 제어하여 입열량을 줄여 주어야 되는 경우가 있는데, 이때 사용자에게 유연성있는 조건을 제시할 수 있다. Fig.9는 선택한 작업조건에서 정성적인 추론을 제시한 화면이다. 이 메뉴는 다른 기능도 가지고 있는데, 만일 절단하고자 하는 재료의 절단조건이 데이터베이스화 되어 있지 않을 때 시스템은 재료의 종류에 따라 일반적으로 타당하다고 여겨지는 절단 조건을 제시한다. 사용자

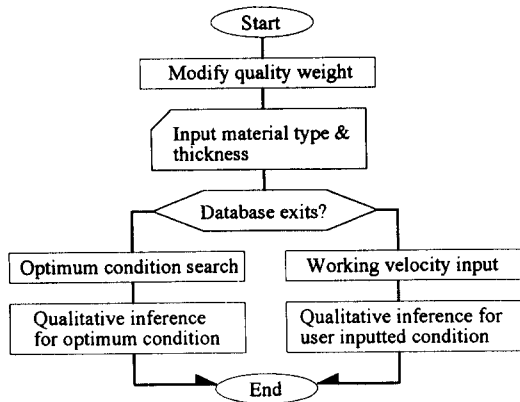


Fig.7 Flowchart for optimum working condition and qualitative comments

Recommended Cutting Condition	
ORDER :	1 2 3 4 5 6 7 8
Velocity(m/min) :	0.25 0.5 0.75 1 1.5 2 3 4
FL(inches) :	2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5
Power(W) :	700 700 700 700 350 350 400 500
Gas :	02 02 02 02 02 02 02 02
P(kg/cm <sup>2</sup> ) :	2 2 2.5 2.5 2.5 2.5 2 1.5
Piercing Frequency(Hz) :	200 200 200 200 500 200 200
Piercing Duty(%) :	36 36 36 36 71 71 63 50
Piercing time(sec) :	0.5 0.5 0.5 0.5 0.3 0.3 0.5 0.5
Frequency(Hz) :	210 240 260 260 0 0 0 0
Duty(%) :	21 25 29 32 0 0 0 0
Kerf_width(mm) :	367 367 400 400 500 500 467 467
Dross(eye-test) :	1 0 0 0 0 0 2 1
Not burning angle(Deg) :	20 20 20 20 45 40 40 30

Which working condition do you want to use ? (1-n)

Fig.8 User interface showing optimum condition

Recommended Cutting Condition	
ORDER :	1 2 3 4 5 6 7 8
Velocity(m/min) :	0.25 0.5 0.75 1 1.5 2 3 4
FL(inches) :	2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5 2.5
Power(W) :	700 700 700 700 350 350 400 500
Gas :	02 02 02 02 02 02 02 02
P(kg/cm <sup>2</sup> ) :	2 2 2.5 2.5 2.5 2.5 2 1.5
Piercing Frequency(Hz) :	200 200 200 200 500 200 200
Piercing Duty(%) :	36 36 36 36 71 71 63 50
Piercing time(sec) :	0.5 0.5 0.5 0.5 0.3 0.3 0.5 0.5
Frequency(Hz) :	210 240 260 260 0 0 0 0
Duty(%) :	21 25 29 32 0 0 0 0
Kerf_width(mm) :	367 367 400 400 500 500 467 467
Dross(eye-test) :	1 0 0 0 0 0 2 1
Not burning angle(Deg) :	20 20 20 20 45 40 40 30

Comments

MATERIAL : SHP1  
Thickness : 1.6

- Suggested nozzle diameter(mm) : 1.133333333
- NOTE : Use large diameter nozzle for cutting of thick material  
Nozzle workpiece distance : 1-2mm  
too long distance -> much cost,bean nozzle interference

Fig.9 Display of qualitative comments for selected working condition

는 전문가 시스템의 조언을 토대로 재료의 절단 조건의 범위를 한정된 영역으로 제한하여 선정에 편의를 기할 수 있으며, 데이터 베이스를 확장하고자 할 경우에는 절단 변수 선정에 있어서 기준을 잡을 수 있도록 하여준다. Fig.10은 절단영역을 시각적인

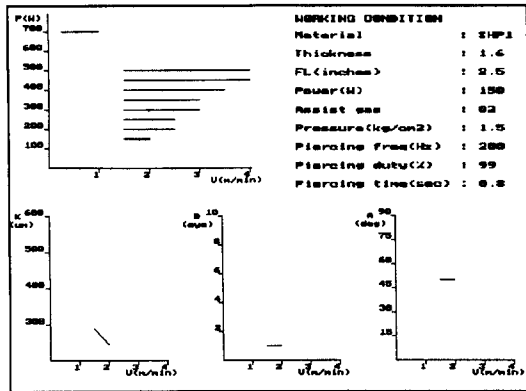


Fig.10 User interface showing working range

Extend database or Replace old data with new data

Lens FL (inches) 2.5

POWER(W) 400

ASSIST GAS TYPE 02

ASSIST GAS P(kg/cm<sup>2</sup>) 1.5

PIERCING FREQ AND DUTY 200 50

PIERCING TIME(sec) 0.5

VELOCITY(m/min) 0.5 1 1.5 2 2.5 3 3.5 4

FREQUENCY (Hz) 210 230 350 400 450 500 500 500

DUTY (%) 25 30 45 100 100 100 100 100

KERF-WIDTH(mm) 300 370 360 350 340 330 350 360

DROSS(eye-test) 4 2 0 0 0 0 0 5

NO BURNING ANGLE(deg) 30 50 50 40 40 40 40 50

Fig.11 User interface for database extension

도표 형식으로 제시하는 화면으로 교육적인 측면도 있는 기능이다. 좌측상단에 있는 그림은 여러가지의 절단속도와 레이저 출력에대한 최적 절단 영역을 보여주고 있다. 화살표 키를 이용하여 원하는 출력을 선택하면 속도 변화에 따른 세가지 절단 품질(즉, 절단폭, 드로스, 절단 가능각)의 크기및 변화가 표시된다. Fig.11은 데이터 베이스의 확장을 위한 화면을 보여준다.

#### 4.4. 절단 조건 평가 실험

실험에서는 직선부 절단과 곡각진 부분의 절단을 수행하였다. 연강의 실험 재료로서는 1.6mm 두께의 열연 강판(SHP1), 냉연강판(SCP1)과 SM10C를 사용하였고, 스테인레스강으로서는 1mm두께의 STS304를 사용하였다. 공정 변수중 렌즈 초점거리(focal length), 노즐-재료간 거리(nozzle-workpiece distance)는 일반적인 조건을 적용했으며 절단 가스 압력, 레이저 출력, 절단 속도를 변화시키면서 실험하였다. 일반적으로 타당하다고 여겨지는 보조가스 압력 범위에서 몇 단계를 선정하고 이 압력하에서 레이저 출력의 변함에 따른 절단속도별 품질 변수를 측정하였다. 직선부 절단에서 측정된 품질 변수는 피어싱 조건, 절단폭(kerf-width)과 드로스(dross)이다. 피어싱 조건은 속도별로 피어싱 조건을 달리 하여 가장 작은 피어싱이 일어나는 조건을 최적 조건으로 선정했으며 절단폭의 측정은 두개의 광원과 현미경(배율 x20)을 이용하여 측정하였다. 실제 절단 형상은 깊이 방향으로 직선이 아니기 때문에 윗면에서 측정된 절단폭은 실제의 절단폭(깊이 방향에 대한 평균 절단폭) 보다 약간 크게 측정된다<sup>10)</sup>. 드로스는 절단부 뒷면에 부착된 산화물의 양을 보고 측정하였는데 재료마다 산화물의 형태가 다르기 때문에 일반적으로 크기만을 가지고 비교하는 것은 무의미하다. 연강은 드로스가 쉽게 제거되기 때문에 드로스가 약간 생겨도 무방하지만 스테인레스강은 드로스가 쉽게 제거되지 않기 때문에 작은 양의 드로스라 할지라도 허용되지 않는다. 드로스 크기는 나안으로 측정하였는데 Fig.12에 측정의 한 예를 보여준다. 다섯가지 서로 다른 상태의 드로스 크기를 보여주고 있으며 각각의 그림 밑에는 본 전문가 시스템에서 도입한 드로스 상태에 대응되는 수치가 나타나 있다. 곡각진 부분 절단에서는 연소한계 예각(no burning edge

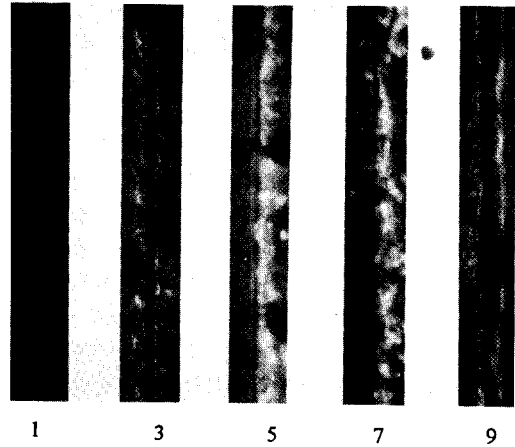


Fig.12 Examples of measure of dross

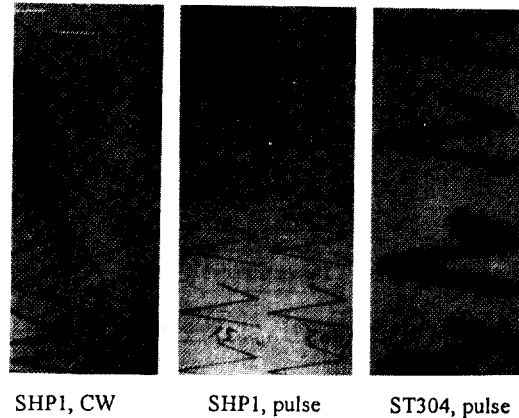


Fig.13 Examples of measure of no burning edge angle

angle)을 측정하였다. Fig.13은 연강 CW절단, 연강 펄스 절단, 스테인레스강에서 연소한계예각을 구하기 위해 절단한 시편의 형상을 보여 준다. 측정은 10 간격으로 이루어졌는데 한계 예각보다 더 작은 각도를 갖는 절단 경로에서는 선단부분이 연소 되거나 녹아서 원하는 정밀도를 얻는것이 어려웠다.

#### 5. 결론 및 고찰

레이저 절단의 전문가 시스템을 구현한 본 논문에서는 레이저 절단의 지식베이스화를 위한 절단 변수 선정, 절단결과의 지식베이스화, 지식베이스를 탐색하여 절단 영역, 절단 품질 그래프, 최적조건을 구하는 방법과 정성적인 추론을 제시하는 방법을

다루었다. 개인용 컴퓨터에서 시스템이 작동하도록 하였으며 수년간 레이저 가공분야에서 종사해온 전문가의 자문을 얻어 시스템의 기능을 선정했는데 개발된 전문가 시스템의 특성은 아래와 같다.

1) 재료는 시중에서 흔히 구할 수 있는 규격을 기준으로 하였으며, 일반적으로 생산현장에서 작업자가 조정할 수 있는 절단 변수를 지식베이스의 변수로 설정하였다.

2) 절단이 가능한 속도, 출력 범위, 절단 품질의 변화 동향을 보여줌으로써 작업자가 작업조건을 선정하는 기준을 제시했다.

3) 데이터 베이스화가 곤란한 정성적인 요소들을 제시하고, 재료 종류별로 일반적으로 인정되는 실험 조건을 제시해 주며, 추론에 대한 근거를 제시했다. 이러한 정성적 추론 기능은 실험 보조, 새로운 데이터 베이스 구축, 초보자 교육에 유용한 기능이다.

본 전문가 시스템을 향후 700W이상의 레이저 시스템에 확대 적용하기 위해서는 몇가지 수정보완이 필요하다. 예를 들면 정성적인 추론과정에서 변수 한계에 대한 수정이 필요하고 700W급에서는 실현이 힘든 재료의 절단을 위해서도 약간의 수정이 필요하다. 또한 보다 향상된 전문가 시스템의 구현을 위해서는 절단하고자 하는 형상을 최적자동배치하고 그 형상 및 절단 공정을 고려한 절단 조건을 도출해주는 컴퓨터 원용 설계 및 가공(CAD/CAM)시스템과의 통합이 필요하리라 사료된다.

## 참 고 문 헌

- 1) J. S. Ian: Multikilowatt laser application, The Industrial Laser Annual Handbook, Pennwell Books, (1990), pp.49-55
- 2) N.N: Artificial intelligence programming with Turbo Prolog, (1986), pp.213
- 3) C.Townsend and D.Feucht: Designing and programming personal expert systems, TAB Books Inc, (1986), pp.9-14
- 4) 정재동, 이준식: Heat transfer analysis of striation formation in laser cutting process, 제3회 국제 레이저 가공기술 심포지움, 대전, (1992), pp. 31-52
- 5) 이광형, 오길록: 퍼지 이론 및 응용 2권, 홍릉과학출판사, (1991), pp.2-3
- 6) 서철용: 횡형압력용기의 치수 및 용접 설계를 위한 전문가 시스템의 개발에 관한 연구, 한국과학기술원 정밀공학과 석사학위 논문, (1992)
- 7) Elaine Rich, Kevin Knight: Artificial intelligence, McGraw hill, (1991), pp.177-182
- 8) 石井 明 and 八木重典: CO<sub>2</sub> レーザ 加工技術, 日刊工業新聞社, (1985), pp.51-114
- 9) 나석주, 노태정, 한국찬: CO<sub>2</sub> Laser 가공 시스템 개발에 관한 연구, 상공자원부 연구 보고서, (1992), pp.7-8
- 10) 박준홍: FDM을 이용한 레이저 절단공정에서의 절단 메카니즘 및 열전달에 관한 연구, 한국과학기술원 정밀공학과 석사학위 논문, (1993)