

## 지능공작기계 지식구조의 규칙베이스 구축

이승우\*, 김동훈, 임선종, 송준엽(한국기계연구원 지능기계연구센터),  
이화기(인하대학교 산업공학과)

### Constructing Rule Base of knowledge structure for Intelligent Machine Tools

S. W. Lee, D. H. Kim, S. J. Lim, J. Y. Song(Intelligent Machine System Research Center, KIMM),  
H. K. Lee(Dept. of Industrial Engineering, INHA Univ.)

#### ABSTRACT

In order to implement Artificial Intelligence, various technologies have been widely used. Artificial Intelligence is applied for many industrial product and machine tools are the center of manufacturing devices in intelligent manufacturing system. The purpose of this paper is to present the construction of Rule Base for knowledge structure that is applicable to machine tools. This system is that decision whether to act in accordance with machine status is support system. It constructs Rule Base of knowledge used of machine tools. The constructed Rule Base facilitates the effective operation and control of machine tools and will provide a systematic way to integrate the expert's knowledge that will apply Intelligent Machine Tools.

**Key Words** : Knowledge(지식), Intelligent Machine Tools(지능공작기계), Rule Base Management System(규칙베이스관리시스템), Reasoning(추론)

#### 1. 서론

최근의 컴퓨터와 네트워크 기술의 발달은 생산 장비에 유연성과 이식성을 부여하고 분산적인 제어 시스템 구성이 가능하게 하였다. 이러한 기술의 발달은 다양한 내/외부의 환경에 적극적으로 대응하면서 시스템을 구성하는 다른 요소들과 협력을 유지할 수 있는 지능화시스템으로 발전하고 있다. 이러한 기술 추세는 공작기계 분야에 까지 영향을 미쳐 기계의 상태를 자율적으로 감지하고 저장된 지식을 바탕으로 외부환경에 대응하며 부족한 지식을 다른 시스템과의 대화를 통해 습득할 수 있는 지능공작기계 까지 출현하고 있다. 지능공작기계는 생산시스템에서 통합의 대상이 아닌 협력의 주체가 되고 있다.

일반적인 알고리즘에 의한 프로그램은 핵심 정보 혹은 지식 처리과정이 애플리케이션 소스 상에 nested if에 의해 하드 코딩되어 있어, 기존의 요건이 변경되거나 새로운 요건이 추가될 경우 변경요건의 반영에 많은 시간, 노력이 필요하고 이에 따른 위험이 동반된다. 이러한 문제점들을 해결하기 위한 방

안으로서 확보된 정보 혹은 지식을 규칙화 하여 규칙베이스로 구성하는 것이다. 규칙이라는 것은 새로운 지식을 창조하는 것이 아니라 기존에 있던 정보 혹은 유/무형의 지식을 정형화한 것을 의미한다.

본 연구에서는 공작기계에서 발생하는 지식을 분류하여 규칙화 하고 이를 이용하여 지능공작기계의 구현에 필요한 지식과 규칙베이스 구성에 대해 연구하였다.

#### 2. 규칙베이스 구성

##### 2.1 공작기계에서의 지식

공작기계는 1만 여종 이상의 부품이 결합되어 작동되는 시스템으로서 가공과 같은 운영 중에 다양한 상태변화와 이에 맞는 신호를 발생한다. 발생하는 상태와 신호를 이용하여 공작기계 운영을 최적화하기 위해서는 이를 지식화 하여 사용하는 것이 필요하다. 공작기계의 지식은 기계종속적인 지식과 기계 독립적인 지식으로 분류할 수 있다. 기계종속적인 지식은 해당 공작기계 자체에서만 발생되어 사용될

수 있는 지식으로 기계고유 구조물의 진동, 열 변형 특성, 절삭성 등이 있다. 기계독립적인 지식은 해당 공작기계뿐만 아니라 모든 공작기계에 사용할 수 있는 지식으로 공정지식, 운용성, 절삭조건 등이 있다.

이러한 지식들은 실험실 차원에서 해당 지식만을 사용하는데 머물고 있으나 공작기계에서 발생하는 다양한 지식을 처리하기 위해서는 습득된 지식을 정형화된 규칙으로 구성하는 것이 효율적이다. Gartner 그룹의 연구 자료를 보면 생산을 포함한 기업의 모든 부분에서 규칙의 사용이 증가하고 있으며, 2007년에는 생산에서 사용하는 약 80% 이상의 정보가 규칙으로 관리되어 질 것이라고 예측하고 있다.

정형화된 규칙들은 규칙베이스를 구성하고 추론 시스템에 기본적인 지식으로 사용된다. Table 1은 지식베이스와 추론방법에 따른 추론시스템을 분류한 것이다.

Table 1 Classification of reasoning system

	구성	형태	비고
지식 베이스	Rule Base System	if - then -	용이성 광범위성
	Frame System	tree 형태	
	Hybrid System	규칙형과 프레임형을 혼합	
	Blackboard System	전문가와 사용자의 협의에 의한 지식 표현	
추론방법	Forward Chaining	초기 Data → 결론	data-driven
	Backward Chaining	결과 → 원인발견	goal-driven

## 2.2 규칙베이스의 구조

의사결정시스템에서 사용되는 규칙이라는 용어는 보통 사용하는 언어에서 의미하는 것보다 훨씬 더 좁은 의미를 가진다. 규칙은 추천, 지령 또는 전략(recommendation, directives or strategies)을 나타내는 구체화된 방법을 제공한다. 이와 같은 규칙은 어떤 영역에서의 문제해결을 위한 지식을 제공하는 경우에 적합하다. 구성된 규칙베이스에 있는 영역지식은 현 상황에 대한 사실과 지식의 집합에 대해 구성된 규칙의 조합으로 표현되어진다. 규칙들은 선행절에 있는 사실들(facts)이 만족되어지면 결과절이 실행되는 구조로 되어있다.

Fig. 1과 같이 규칙들은 추론 단위인 규칙\_세트에 구성되어 있으며 외부 시스템과의 인터페이스를 위해 외부 자바 클래스 변수에 조건을 입력하고 추론된 결과를 지정된 변수에 저장한다.

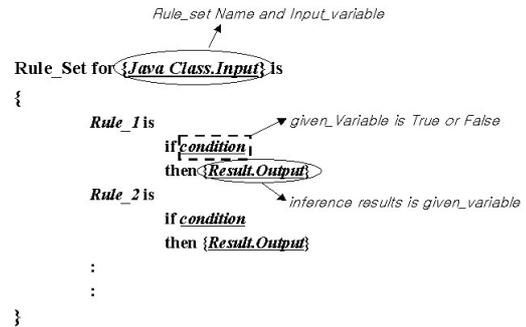


Fig. 1 The structure of rule\_set and rule

구성되는 규칙은 Table 2에 나타난 것 같이 제약 규칙, 권장규칙 등 다양하게 나타낼 수 있으며 구성된 규칙에 따라 전/후향 추론의 방법 등이 적용된다.

Table 2 Classification of rule and its examples

용어	정의	예(examples)	
Term(용어)	용어정의	보정값, 절삭조건	
Fact(사실)	용어와 용어를 연결하는 사실	보정값은 온도 에 의해 계산	
Rule	Constrains (제약규칙)	참/거짓으로 판정되는 조건문	온도 50℃ 보정값 20μm
	Guideline (권장규칙)	참/거짓으로 판정되도록 유도 권고조건문	온도 100℃ 이상 은 바람직하지 않다.
	Action Enabler (실행규칙)	참/거짓 판단 이벤트, 메시지, 실행 작동	온도 70℃ 이상 Oil Cooler 작동
	WorkFlow (흐름제어)	규칙_세트간 흐름 제어	100℃ 이상 절삭조건 재선 정으로 이동
	Computation (계산규칙)	계산 알고리즘 포함된 규칙	보정값 = f(온도×dxyz)
	Inference (추론제어)	조건을 판별하여 새로운 사실 설정, 추론영향	25℃ 이하 보정 값 실행 없음 보정값 실행 Cooler 작동정지

## 2.3 구축된 규칙베이스를 이용한 지식 추론

추론시스템(reasoning system)은 구축된 규칙베이스를 이용하여 현재의 상태를 판단하거나 정의된 사실을 검증하기 위한 방법으로 사용된다. 특히 if - then - 규칙기법은 인공지능분야에서 사용되는 선언적 지식표현에서 가장 보편화된 방법이다. 이와 같은 이유에는 지식을 규칙으로 구성하기 쉽고 사용자나 지식공학자가 규칙을 읽고 이해하기 용이하며 이로 인해 새로운 지식을 쉽게 추가하거나 기존의 지

식을 쉽게 변경할 수 있기 때문이다.

규칙베이스를 기반으로 한 추론시스템은 if - then - 규칙과 사실들(facts)의 조합인 지식베이스, 파생된 규칙들과 데이터를 저장하는 데이터베이스 혹은 워킹 메모리(working memory)와 구축된 규칙들과 데이터를 추론에 사용하기 위해 추론논리가 포함되어 있는 추론엔진(inference engine) 등으로 구성되어 있다. Fig. 2는 기본적인 추론시스템의 구성을 나타낸 것이다.

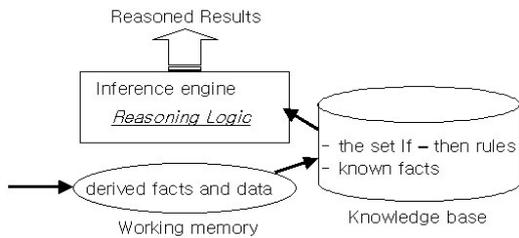


Fig. 2 Configuration of reasoning system

앞에서 언급한 바와 같이 규칙베이스는 여러 개의 규칙\_세트로 구성되어 있으며 규칙\_세트는 다수의 규칙들로 구성되어 있다. 규칙들이 많아지거나 관리해야 하는 규칙\_세트가 많으면 추론속도에 영향을 받게 된다. 따라서 대부분의 규칙시스템들은 추론속도의 향상을 위해 각각의 규칙\_세트에 라벨 혹은 규칙의 이름을 허용한다. 이는 규칙을 쉽게 이해하고 수정할 수 있도록 하며 추론하는 동안에 추론과정의 추적을 가능하게 한다.

추론방법은 전향추론(forward Chaining)과 후향추론(backward chaining) 방법이 있다. 전향추론 방법은 규칙베이스에 있는 규칙들이 초기의 데이터들을 근거로 하여 새로운 사실을 추론해 내는 데이터 유추과정이라 할 수 있으며, 일반적인 서술식 논리에서 사용하는 해법 알고리즘을 사용하지 않는다. 즉, 간단하고 직선적인 규칙들에 의해서 새로운 데이터를 생성시키는 것이다. 전향추론의 큰 장점은 추론속도가 빠르다는 것으로 실제로 빠른 반응을 요하는 진단시스템과 실시간 모니터링 분야에 많이 사용되었다. 전향추론에서는 빠른 추론속도를 위해 Rete 알고리즘을 대부분 사용한다. 이는 데이터, 조건검사, 규칙들 간의 종속성을 관리하기 위한 네트워크 데이터 구조를 가지기 때문에 각각의 규칙에 대해 선행절의 조건 대조작업에 필요한 검사회수를 줄일 수 있다.

후향추론은 규칙에서 결과절 혹은 목적절이 먼저 평가되고 선행절의 원인을 찾기 위해 되돌아가는 방법이기 때문에 goal-directed, goal-driven 혹은 suggest 방법이라고도 한다. 결과절이 참(true)인지 아닌지에 대한 질의에 답하는데 규칙을 사용하기 때문에 전향추론에 비해 훨씬 더 규칙을 집중하여 검토한다. 따

라서 전향추론에 비해 추론시간이 많이 소용된다. 이 방법은 주로 사용자의 질문에 응답하는 자문적(advisory)인 추론시스템에 많이 사용된다.

### 3. 공작기계 지식의 규칙베이스 구성

앞 장에서 구분한 공작기계의 지식 중에서 기계 종속적인 지식에서는 열변형량 예측을 규칙베이스로 구성하였으며, 기계독립적인 지식에서는 공구재질과 가공방법에 따른 절삭조건 추천에 대해 규칙베이스를 구성하였다.

#### 3.1 열 변형 예측 규칙베이스

공작기계에서 발생하는 오차는 오차의 형태에 따라 정적오차(quasi-static error)와 동적오차(dynamic error)로 구분한다. 정적오차 중에서 열변형 오차(thermal error)는 공작기계의 정밀도에 중요한 요소가 되어 왔으며 공작기계 전체 오차량의 약 70%정도를 차지하는 것으로 보고 되고 있다.

열 변형 예측 규칙베이스의 구성을 위해 3축 밀링머신을 대상으로 열 변형실험을 하였다. 실험은 3개의 온도센서와 와전류(eddy current) 형식의 비접촉 센서를 사용하여 예측모델을 구성하였다. 예측모델은 열 변형에 의해 발생하는 3축 방향의 열변형량을 종속변수로 삼고 이 종속변수의 변동을 설명하기 위해 네 개의 독립변수를 각각 z축, y축 상/하 및 대기의 온도변화를 입력하는 다중선형회귀분석법을 사용하였다. Fig. 3은 열 변형실험에 따른 온도변화를 나타낸 것이다.

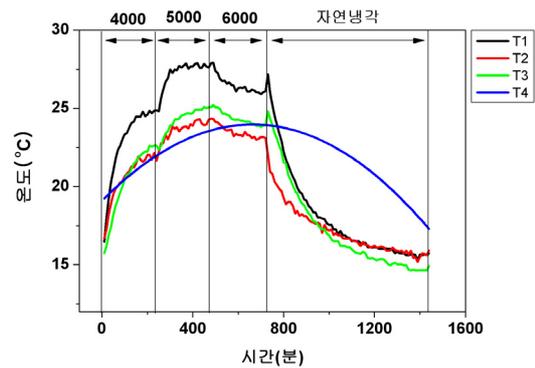


Fig.3 Temperature change of 4 position

스캔된 온도 값을 조건절로 하고 예측된 변위량을 목적절로 하는 전향추론방법의 규칙베이스를 구성하였다. 구성된 규칙베이스를 Fig. 4에 나타내었다. 선행절은 온도 센서에서 올라온 온도 영역을 기준으로 조건이 일치되면 목적절에 변위량을 제시하도록 구성하였다.

```

// ThermalError Prediction using regression model
ruleSet RS_thermo for {P_thermo: a Thermo2} is
{
  rule Rule1 is
  if (P_thermo.temp_ch1 = 16.4639 and P_thermo.temp_ch2 = 16.69344 and
P_thermo.temp_ch3 = 16.7311)
  then
  {
    P_thermo.pre_ch1 = 0.
    P_thermo.pre_ch2 = 0.
    P_thermo.pre_ch3 = 0.
  }

  rule Rule2 is
  if ((P_thermo.temp_ch1 > 16.4639 and P_thermo.temp_ch1 < 16.0366) and
(P_thermo.temp_ch2 > 16.69344 and P_thermo.temp_ch2 < 17.31017) and
(P_thermo.temp_ch3 > 16.7331 and P_thermo.temp_ch3 < 16.23061))
  then
  {
    P_thermo.pre_ch1 = 2.252079.
    P_thermo.pre_ch2 = 1.060244.
    P_thermo.pre_ch3 = -17.1429.
  }

  rule Rule3 is
  if ((P_thermo.temp_ch1 > 16.0366 and P_thermo.temp_ch1 < 19.16096) and
(P_thermo.temp_ch2 > 17.31017 and P_thermo.temp_ch2 < 16.23061) and
(P_thermo.temp_ch3 > 16.23061 and P_thermo.temp_ch3 < 16.56239))
  then
  {
    P_thermo.pre_ch1 = 6.690074.
    P_thermo.pre_ch2 = 3.909003.
    P_thermo.pre_ch3 = -26.7303.
  }

  rule Rule4 is
  if ((P_thermo.temp_ch1 > 19.16096 and P_thermo.temp_ch1 < 20.29456) and
(P_thermo.temp_ch2 > 16.23061 and P_thermo.temp_ch2 < 16.56239) and
(P_thermo.temp_ch3 > 16.56239 and P_thermo.temp_ch3 < 17.35677))
  then
  {
    P_thermo.pre_ch1 = 10.57218.
    P_thermo.pre_ch2 = 6.363616.
    P_thermo.pre_ch3 = -36.2023.
  }

  rule Rule5 is
  if ((P_thermo.temp_ch1 > 20.29456 and P_thermo.temp_ch1 < 20.99726) and
(P_thermo.temp_ch2 > 17.35677 and P_thermo.temp_ch2 < 16.93336) and
(P_thermo.temp_ch3 > 17.35677 and P_thermo.temp_ch3 < 16.17423))
  then
  {
    P_thermo.pre_ch1 = 15.00635.
    P_thermo.pre_ch2 = 9.767733.
    P_thermo.pre_ch3 = -36.4666.
  }
}

```

Fig. 4 Rule Base of prediction for thermal error

### 3.2 절삭조건 추천 규칙베이스

제품의 종류가 다양해지고 수명이 점차 짧아지면서 금형을 경제적으로 단시간 내에 생산하기 위해 노력하고 있다. NC 가공에서의 절삭조건은 가공시간을 결정하는 중요한 요소이며, 가공정밀도와 공구 수명에도 크게 영향을 미친다.

```

// Cutting Condition of Ball_End_MILL for working material is
ruleSet RS_CuttingCondition for {P_cc: a CuttingCondition} is
{
  rule Rule1 is
  if (P_cc.mat_tool = "보통강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.dia_tool = 1.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 37500.
    P_cc.mm_min = 196.
  }

  rule Rule2 is
  if (P_cc.mat_tool = "보통강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.dia_tool = 2.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 16500.
    P_cc.mm_min = 196.
  }

  rule Rule3 is
  if (P_cc.mat_tool = "보통강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.dia_tool = 3.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 12000.
    P_cc.mm_min = 196.
  }

  rule Rule115 is
  if (P_cc.mat_tool = "합금강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.angle < 16 and
P_cc.dia_tool = 1.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 41800.
    P_cc.mm_min = 200.03.
    P_cc.mm_tooth = 2883.
  }

  rule Rule116 is
  if (P_cc.mat_tool = "합금강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.angle >= 16 and
P_cc.dia_tool = 1.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 41800.
    P_cc.mm_min = 200.03.
    P_cc.mm_tooth = 2883.
  }

  rule Rule117 is
  if (P_cc.mat_tool = "합금강" or P_cc.mat_tool = "합금강") and
P_cc.inp < 20
and P_cc.no_cut = 2 and P_cc.angle < 16 and
P_cc.dia_tool = 2.0)
  then
  {
    P_cc.RPM = 41800.
    P_cc.mm_min = 320.04.
    P_cc.mm_tooth = 320.04.
  }
}

```

Fig. 5 Rule Base of Cutting Condition for ball end mills

금형가공에 많이 사용되는 볼 엔드밀을 대상으로 피삭재질과 공구의 조건에 대한 절삭조건을 추천하

는 것으로 Fig. 5와 같이 규칙베이스를 구성하였다. 규칙에 사용된 절삭조건 지식은 공구제조사에서 제공하는 기술 데이터를 사용하였다. 절삭조건 추천은 피삭재질, 공구날수, 경도(HRC), 공구경을 선행절의 조건으로 하고 목적절에 주축회전수(rpm), 테이블이송속도(mm/min), 인당이송속도(mm/tooth) 및 절삭속도(m/min)를 출력하는 것으로 하였다.

## 4. 결론

본 연구에서는 지능공작기계의 구현을 위해 공작기계의 상태를 판단하고 사용되는 정보를 정형화된 지식으로 구현하고 이를 추론시스템에 사용하기 위해 규칙베이스를 구성하였다. 구성된 규칙베이스는 기계종속적인 지식과 기계독립적인 지식으로 구분하여 대표적으로 열 변형 보정에 대한 규칙과 피삭재질과 가공방법에 따른 절삭조건 추천 규칙을 구성하였다. 이는 규칙기반의 추론시스템의 지식베이스로 사용되어 공작기계의 현재의 상태 판단과 운영에 필요한 의사결정을 지원하는 기반이 될 것이다. 추후에는 구현된 추론시스템을 에이전트화 하여 개방형 제어기에 실장하는 연구를 수행할 예정이다.

## 후기

본 연구는 국가지정연구실 사업인 “지식진화기반 지능제조설비 및 인터넷 기반 통합관리 기술”의 일환으로 진행되었음.

## 참고문헌

1. Joseph P. Bigus and Jennifer Bigus, Constructing Intelligent Agents Using Java, pp. 69-113, Wiley, 2001.
2. Ranjit Bose, "Intelligent Agents Framework for Developing Knowledge-Based Decision Support System for Collaborative Organizational Process," Expert System With Applications, Vol.11, No.13, pp. 247-261, 1996.
3. 김선호, "지식기반형 지능화 기계와 지식진화형 지능화 기계," 한국정밀공학회지, 제19권, 제2호, pp. 17-25, 2002.
4. 이승우, 김동훈, 임선중, 송준엽, 이화기, "지능공작기계 구현을 위한 Decision Support Agent 설계," 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 821-824, 2004.