공정계획 및 재료선정을 위한 계층구조 전문가시스템

A Hierarchical Expert System for Process Planning and Material Selection

권순범

서울특별시 성북구 삼선동 2가 389 (우) 136-792

한성대학교 경상학부

전화: 760-4391 **팩스**: 760-4217

전자우편: sbkwon@computer.org

이영봉

국방과학연구소 책임연구원

(YoungBLee@sunam.kreonet.re.kr)

이재규

한국과학기술원 테크노경영대학원 교수

(jklee@msd.kaist.ac.kr)

*한국전문가시스템학회 98 춘계학술대회 제출용 논문

공정계획 및 재료선정을 위한 계층구조 전문가시스템

A Hierarchical Expert System for Process Planning and Material Selection

권순범* 이영봉** 이재규***[1)]

ABSTRACT

Process planning(selection and ordering of processes) and material selection for product manufacturing are two key things determined before taking full-scale manufacturing. Knowledge on product design, material characteristics, processes, time and cost all-together are mutually related and should be considered concurrently. Due to the complexity of problem, human experts have got only one of the feasible solutions with their field knowledge and experiences.

We proposed a hierarchical expert system framework of knowledge representation and reasoning in order to overcome the complexity. Manufacturing processes have inherently hierarchical relationships, from top level processes to bottom level operation processes. Process plan of one level is posted in process blackboard and used for lower level process planning. Process information on blackboard are also used to readjust the process plan in order to resolve the dead-end or inconsistency situation during reasoning.

Decision variables for process, material, tool, time and cost are represented as object frames, and their relationships are represented as constraints and rules. Constraints are for relationship among variables such as compatibility, numerical inequality etc. Rules are for causal relationships among variables to reflect human expert's knowledge such as process precedencies. CRSP(Constraint and Rule Satisfaction Problem) approach is adopted in order to obtain solution to satisfy both constraints and rules. The trade-off procedure gives user chances to see the impact of change of important variables such as material, cost, time and helps to determine the preferred solution. We are developing the prototype system using visual C++ MFC, UNIK, and UNIK-CRSP on PC.

---

* 한성대학교 경상학부 조교수

** 국방과학연구소 책임연구원

*** 한국과학기술원 테크노경영대학원 교수

1. 서론

제품의 설계가 완료되면 제품의 형상이 설정되고, 가공과 관련된 각종 설계수치(설계요구사항)가 확정된다. 이후 제품 가공을 위해서는 제조 공정계획(공정 선정과 순서의 결정)과 재료의 선택이 이루어져야 한다. 지금까지 공정계획과 재료의 선택은 현장의 실무 전문가들이 오랫동안의 현장 경험과 지식을 이용해 이루어져 왔다. 그러나, 이 문제는 설계 요구조건, 설계요구 조건을 만족하는 재료지식(재료 특성), 그리고 공정설계 지식이 모두 동시에 고려되어야 하는 문제로 관련된 고려요소가 많고 요소들 간의 관계도 복잡하다. 이러한 문제의 복잡성으로 인해 만족할 만한 해를 찾는 것이 쉽지 않고, 상황변화(공정의 변화, 재료의 변화, 등등)에 대한 신속한 대응도 불가능하다.

이 문제를 해결하기 위하여 전문가시스템 기법을 이용하여 현장 실무전문가의 지식과 관련변수 들을 표현하여 적절한 해를 찾는 노력이 시도되었다(Zhang and Wright, 1989; Prabhu 1992; Beiter et al. 1993; Dong et al. 1996; Younis and Wahab, 1997). 공정간의 순서결정을 위한 전문가의 지식을 나타내고 추론한 연구는 있었으나(Bock, 1991), 재료선택과 제조공정 계획 문제를 동시에 고려하지는 못했다. 재료의 선택이 제조공정 계획에 미치는 영향을 규칙으로 표현하여 공정계획 수립에 전문가시스템 기법을 도입한 연구가 있었으나(Evbuomwan et al. 1995), 재료의 선택과 공정계획 간 서로 영향을 미치는 양방향적 관계가 반영되지 않았다. 재료선정과 공정계획의 양방향적 특성을 고려하기 위한 제약규칙만족기법(CRSP: Constraint and Rule Satisfaction Problem)을 이용한 연구도 있었으나(Lee et al. 1997) 공정계획의 계층적 특성이 반영되지 않았다.

본 연구는 설계 요구조건, 설계요구 조건을 만족하는 재료지식(재료 특성), 그리고 공정설계 지식을 모두 반영하는 공정계획수립과 재료선택 문제의 해결 방법론을 제시하고자 한다. 공정계획 문제의 구조는 상위 프로세스가 결정되고 그에 따라서 결정된 상위 프로세스에 종속되는 하위 프로세스가 결정되는 계층적 구조이다. 따라서 계층적 지식표현과 추론구조를 갖는 전문가 시스템을 제안한다. 세부적으로 공정의 결정은 설계요구사항과 전문가의 지식에 의해서 결정되며, 이 때에 결정되는 결정 변수의 값에 따라서 재료가 동시에 선택되어지고, 선택된 재료는 다시 가공방법 등의 다른 결정요소에 영향을 미친다. 또한 결정변수들(재료선택, 가공방법 등)이 정해짐에 따라서 발생되는 비용도 계산되어 전체 제조비용을 얻을 수 있다. 이러한 상호 연관되어 있는 변수간의 복잡한 관계를 표현하는 것과, 표현된 지식을 이용하여 해를 찾아 주는 것, 그리고 여러 결정요소간의 값조정을 통한 상호절충(trade-off)이 가능하도록 하는 프레임워크을 제안한다.

본 연구에서는 자동차 엔진 부품인 피스톤 뭉치의 피스톤 덮개 부품([그림 9])에 대한 재료선택과 공정계획 문제(이후 '예제문제')를 예로 설명한다. 전문가시스템 개발 도구인

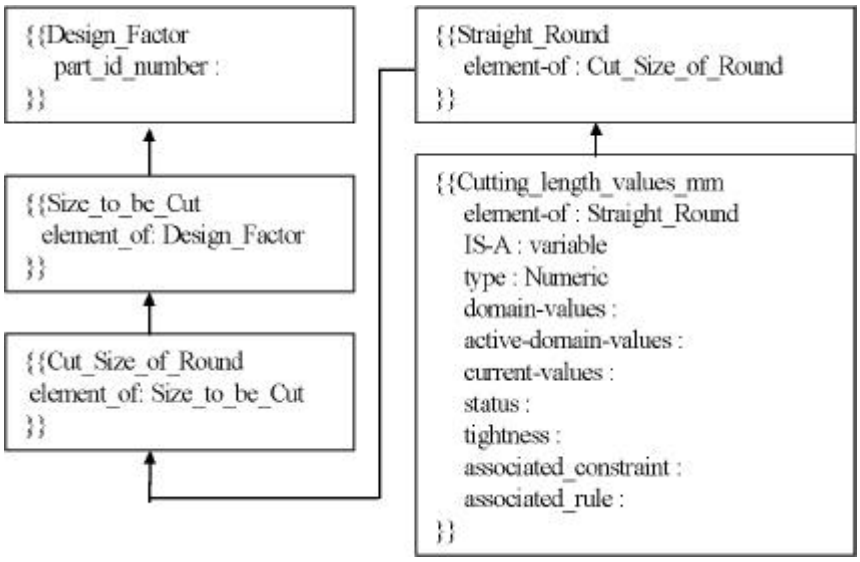
UNIK, 제약과 규칙만족문제의 해결도구인 UNIK-CRSP, 그리고 Visual C++ MFC를 이용하여 현재 프로토타입 시스템의 개발 중에 있다.

2. 변수와 지식의 표현

예제문제의 변수와 지식은 크게 네 가지로 구분할 수 있다.

2.1 설계변수

설계변수는 부품의 형상, 가공치수, 가공 면의 표면조도와 공차, 물리적 성질, 기계적 성질, 부품의 열처리 요구사항 등의 설계요구사항을 나타낸다. 각각의 설계변수는 객체로서 프레임으로 표현된다. 프레임의 소속관계(IS-A, element-of)를 이용하여 서로 연결, 구조화되어 있다. [그림 1]은 하나의 설계변수와 상위변수와의 소속관계를 나타낸다.



[그림 1] 설계변수의 표현

2.2 공정변수와 지식

공정지식은 주로 현장전문가의 지식을 규칙의 형태로 표현한 것으로, 규칙의 조건부는 설계요구사항(설계변수)과 재료변수이고, 결론부는 공정의 집합이다. 공정지식은 '공정순서 규칙'과 '공정포함 규칙'의 두 가지 종류가 있다. 공정순서 규칙의 결론부에는 공정의 집합이 오는데(그림 2 참조) 하나의 공정 집합에 속한 공정들은 선택된 공정으로 가공순서를 의미한다. 공정포함 규칙의 결론부에도 공정의 집합이 오는데(그림 3 참조), 순서는 의미 없고 집합에 속한 공정이 포함되어야 함을 의미한다. [그림 2]의 공정순서 규칙-24는 조건을 만족하면 (Preparation, Machining, Finishing) 세 개의 공정이 제시된 순서대로 진행되어야 함을 의미한다. [그림 3]의 규칙은 조건을 만족하면 Milling이나 NC-Machining이 Machining의 하위 공정에 포함되어야 함을 의미한다.

```
{{Precedence-Rule24
  IF  (AND (IS Cutting_TF  TRUE)
           (IS Cutting_Shape (flat_surface curved_surface inside_surface
                              outside_surface hole irregular_surface_type slot
                              hollow_type... ))
           (IS Finish_Assignment (electroplating chromating
                                  phosphating anodizing ...))
           (IS Metallic_Comp TRUE))
  THEN    (IS Process_Precedence (Preparation Machining Finishing))
}}
```

[그림 2] 공정지식(공정순서 규칙)

```
{{ Precedence-Rule-12
 IF  (AND  (< Surface_Roughness_of_Machined  250)
           (>= Surface_Roughness_of_Machined  32)
           (< Tolerance_of_Machined  0.050)
           (>= Tolerance_of_Machined  0.015)
           (<= RM_Hardness_High_HrC 32)
           (IS Part_Shape (Cylinder Block Irregular_Form)
           (IS Cutting_Shape (flat_surface curved_surface))
THEN  (IS Machining_Process (Milling NC_Machining))
}}
```

[그림 3] 공정지식(공정포함 규칙)

2.3 재료변수와 지식

재료변수는 재료의 형상, 화학조성, 기계적 물리적 특성, 표면조도 등의 재료 특성을 나타낸다. 재료변수의 표현과 변수간의 관계는 설계변수와 동일한 방법으로 프레임과 소속관계를 이용한다. 재료지식은 설계요구사항을 만족하는 재료의 선택과 관련된 내용으로, 주로 제약(constraint)으로 표현된다.

[그림 4]는 제약의 여러 형태(compatibility, inequality, functional assignment, mandatory equality) 중에서 부등관계(inequality)로 재료의 인장강도(재료변수값)가 설계요구 사항의 인장강도(설계변수값)보다 크거나 같아야 한다는 제약이다.

```
{{Constraint1
      IS-A : constraint
      type : algebraic_inequality
      associated_variables : Tensile_Strength RM_Tensile_Strength
      relation : Tensile_Strength <= RM_Tensile_Strength
}}
```

[그림 4] 재료지식(부등관계 제약)

2.4 비용변수와 지식

재료, 공구, 가공방법 등의 변수값이 결정되면 각 가공부위별 가공시간, 설치기간, 요구기술 수준별 인건비 등이 정해지고 따라서 비용변수의 값이 계산된다. 비용지식은 계산할당(functional assignment) 형태의 제약으로 표현된다. 예제문제에서 비용과 관련된 변수는 각각의 작업별로 여러 개이며, 비용변수 간에는 계산할당 제약으로 연결되어 최종적으로 전체 가공비용이 계산된다. [그림 5]는 milling의 tooling 비용을 계산하는 제약과 변수(milling_tool_cost)이다. 가공 시간에 대해서도 비용과 같은 방법으로 시간 변수와 계산할당 제약을 이용하여 총 가공시간이 계산될 수 있다.

```
{{Constraint_136
    IS-A : constraint
    type : functional_assignment
    dependent_variable : milling_tooling_cost
    independent_variables : milling_tool_cost jig_fixture_cost
    relation : milling_tooling_cost = milling_tool_cost + jig_fixture_ cost
}}
```

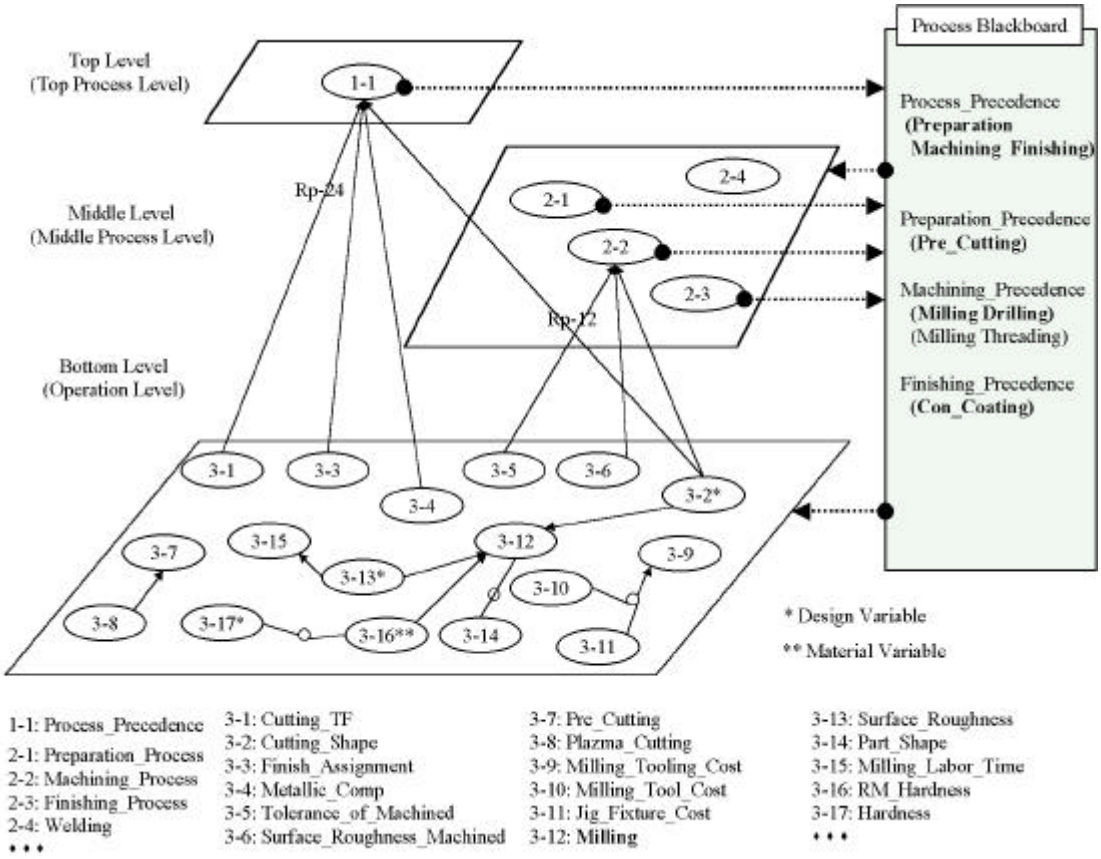
[그림 5] 비용지식

3. 계층 구조

공정계획 문제는 일반적으로 계층적 구조를 갖는다. 피스톤 덮개 부품의 예에서는 공정계층과 작업계층의 2 계층 공정으로 나눌 수 있으며, 대상 제품의 특성에 따라서 제조공정이 3개 이상의 계층도 가질 수 있다. 본 논문에서 제시하는 계층적 방법론은 중간 계층의 추가만으로 제조공정과 재료선택의 문제를 해결할 수 있는 틀을 제공한다. [그림 6]은 피스톤 덮개 부품 제조공정 지식의 3계층을 나타내는 그림이다.

3.1 최상위 계층

최상위 계층에서는 최상위의 공정선택과 순서가 결정된다. 현장 전문가의 지식을 표현한 규칙(공정순서 규칙)이 추론되어 공정이 결정된다. [그림 6]에서는 최하위 계층의 변수값들에 의해서 공정순서 규칙-24[그림 2]가 추론되어 (Preparation, Machining, Finishing)의 공정이 선택되고 동시에 순서가 결정되었다. 예제문제에서 최상위 공정의 결정과 관련된 규칙은 모두 26개이며, 결론변수는 Process-precedence라는 동일한 변수를 갖는다. 최상위 공정순서 규칙의 추론으로 얻어진 공정은 공정흑판(process blackboard)에 기록되어, 다음 계층의 공정 결정에 사용된다.



[그림 6] 계층적 지식과 공정흑판

3.2 중간계층

중간 계층에서는 최상위 계층에서 결정된 공정 순서대로 종속된 하위 공정 순서를 결정한다. 그림 예에서 최상위 공정이 Preparation -> Machining -> Finishing이므로, Preparation의 하위공정인 Pre-cutting, Casting, Forging 중에서 가공품의 설계특성에 따라서 하위공정이 선택, 순서가 결정된다. 그리고 나서 Machining의 하위공정(Broaching, Milling, Grinding, Shaping, Turning, Drilling, Boring, NC-Machining ...)이 결정되고, 마지막으로 Finishing의 하위공정이 결정된다. 예제문제에서 최상위 계층에서의 공정결정과의 차이점은 공정포함 규칙이 반영되어야 한다는 것이다.

공정의 순서는 두 가지 종류의 규칙인 '공정순서 규칙'과 '공정포함 규칙'의 추론으로 결정된다. 예를 들면, Machining 하위공정을 결정함에 있어서 공정순서 규칙의 추론으로 (Milling Drilling), (Milling Threading), (Drilling Tapping)의 공정집합이 얻어지고, 공정포함 규칙에 의해, Milling과 NC-Machining이 얻어 졌다면, Milling이나 NC-Machining이 포함된 공정인 (Milling Drilling), (Milling Threading)이 '공정대안 집합'이 된다. 두 가지 종류의 공정규칙 추론으로 얻어진 공정 혹은 공정의 집합은 위와 같은 해소과정(resolution)과

정을 거쳐 공정대안 집합을 형성하게 된다. 공정대안 집합이 구해지면, 공정대안 중에서 사용자가 선택한 공정으로 다음 계층을 추론하게 된다. 구해진 공정대안 집합은 공정흑판에 기록되며, 사용자가 선택한 공정이 표시된다. 예제문제의 최상위 계층에서는 공정순서 규칙만 있어서 공정해소 과정이 필요 없었으나, 가공 제품에 따라서는 최상위 계층에서도 이러한 공정해소 과정이 요구될 수도 있다. 또한 예제문제에서는 중간계층이 하나이지만 두 개 이상일 수 있으며, 이 경우에 추론 과정은 동일한 방법을 적용한다.

3.3 최하위 계층

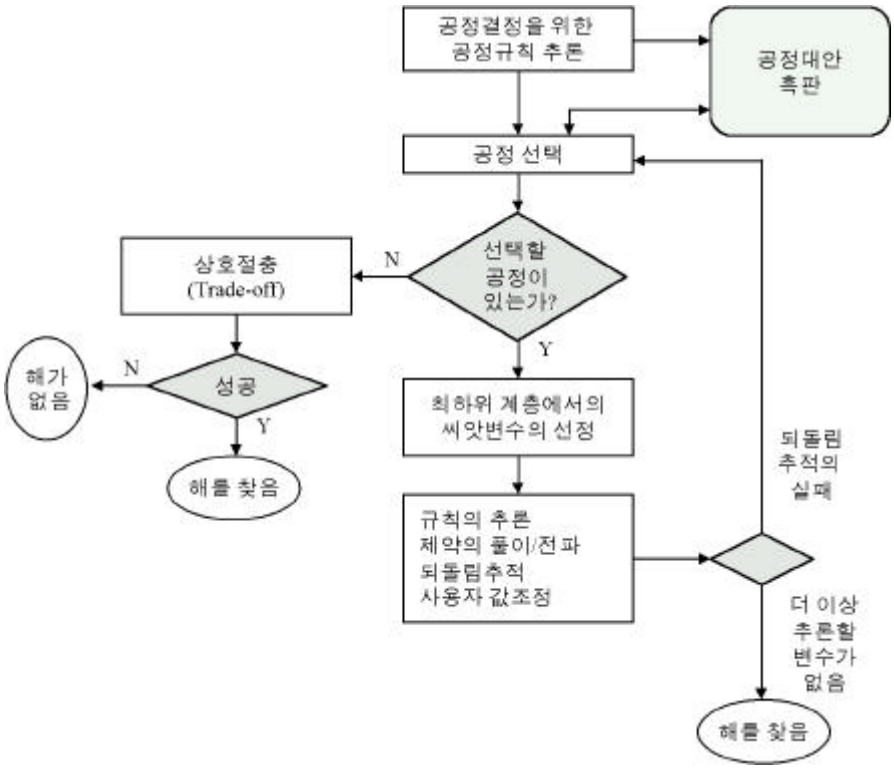
최하위 계층에서는 최하위의 바로 위 계층에서 결정된 공정 순서에 따라서 추론이 이루어진다. 예제문제에서 (Milling Drilling)이 선택된 공정이라면, 최하위 계층에서는 Milling 변수를 추론의 시작점(씨앗변수: seed variable)으로 해서 밀링과 관련된 규칙과 제약을 추론한다. Milling과 관련된 규칙과 제약의 추론이 완결되고 나서 다음번 공정인 Drilling을 새로운 추론의 시작점으로 하여 다시 추론이 진행된다.

최하위 계층의 씨앗변수에서부터의 추론은 여러 결정변수간의 복잡한 관계를 표현한 제약과 규칙을 만족하도록 하는 제약규칙만족풀이 기법을 이용한다. 기존의 제약풀이만족 기법과의 차이점은 씨앗변수간에 우선 순위가 있다는 것으로 순위가 앞선 변수와 관련된 제약과 규칙이 모두 추론되고 나서 다음 순위의 씨앗변수와 관련된 제약과 규칙이 추론된다는 점이다. 즉, 기존의 제약규칙 만족기법에 순서가 있는 추론방법(순서를 갖는 제약규칙만족기법: Ordered CRSP)이다.

최하위 계층에서 순서를 갖는 제약규칙만족 풀이로 공구, 가공방법 등이 결정되고, 이러한 변수값이 정해짐에 따라서 가공비용이 계산된다. [그림 6]에서 보듯이 최상위과 중간 계층의 공정수립을 위한 공정규칙은 조건부 변수가 최하위계층에 있는 변수들이므로 최하위 변수의 일부는 이미 변수값이 결정된 상태에서 최하위 계층의 추론이 진행된다. 최하위 계층에서의 추론 중에 해를 얻지 못하는 상황(막다른 길: dead-end)이나 불일치(inconsistency)가 발생하면, 기존의 제약규칙만족문제 기법에서의 되돌림추적(backtracking) 방법과 사용자 답변의 재조정을 이용하여 최하위 계층 내에서 해결을 시도한다(Lee and Kwon, 1995).

3.4 계층추론 알고리즘

[그림 7]은 계층추론 알고리즘의 흐름도 이다. 최상위 계층에서부터 공정결정을 위한 추론이 시작되고, 선택된 공정은 공정흑판에 기록된다. 최하위 계층에서의 추론은 순서를 갖는 제약규칙만족 기법으로 시행된다. 막다른 길이나 불일치 상황이 발생했으나, 되돌림추적이나 사용자 답변의 재조정으로 해소되지 않으면, 공정대안 흑판을 참조하여 바로 위 계층의 공정대안이 남아있는 가를 검토한다. 만약, 남아 있으면 남아 있는 공정대안을 새로운 공정으



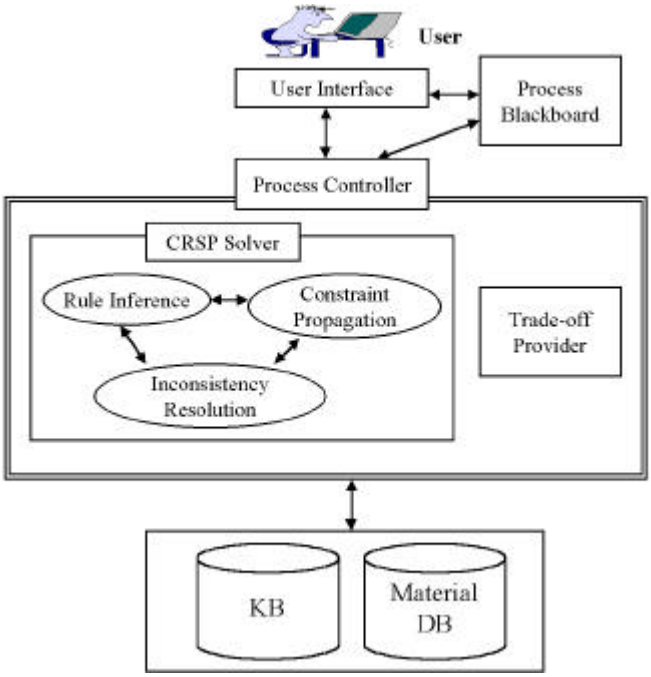
[그림 7] 계층추론 알고리즘의 흐름도

로 선택하여, 최하위 계층의 추론을 반복한다. 만약, 공정대안 흑판에 바로 위 계층의 공정대안이 더 이상 남아 있지 않으면, 다시 한 단계 위 계층의 공정대안이 남아 있는가를 검토하여 해결을 시도한다. 최상위 계층의 공정까지 대안이 남아있지 않으면, 예산이나 재료선정 등의 주요 결정변수 값을 변화시켜서 그 변화의 효과를 사용자에게 보여주어 상호절충(trade-off)을 시도한다. 상호절충에서 주로 시도되는 결정변수의 변화는 예산변수의 증가와 재료의 변화이다. 어느 정도의 예산증가로 비용제약이 극복될 수 있는가와 재료를 바꿈으로 해서 어느 정도의 비용과 시간제약이 극복되는 가의 상호절충이 시도될 수 있다.

4. 시스템 아키텍쳐와 예제화면

4.1 시스템 아키텍쳐

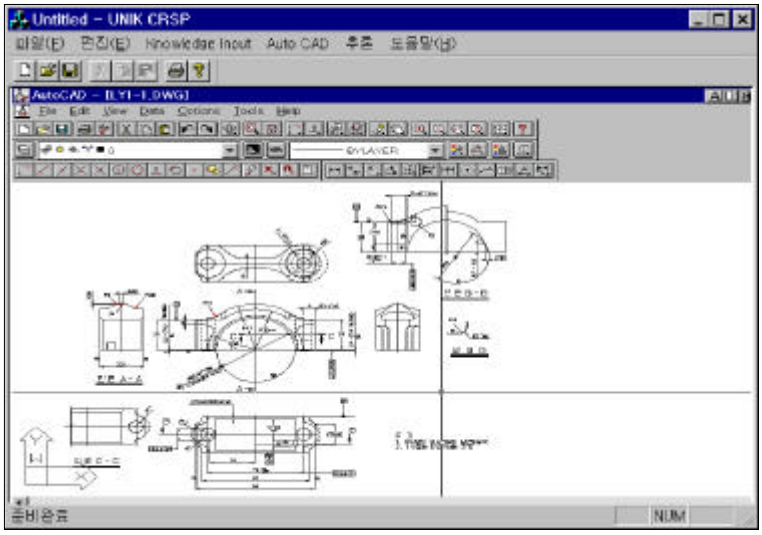
[그림 8]은 프로토타입 시스템의 아키텍쳐이다. 계층별 공정선정 후에, 선정된 공정대안을 여러 서브시스템이 공유하기 위해서 흑판(blackboard)이 도입되었으며, 공정 제어모듈이 계층별 추론을 제어한다. 사용자는 추론의 진행상황을 점검할 수 있고, 추론 중인 공정에 대해서 비용과 재료 등의 주요 결정변수의 값을 점검할 수 있다. 특히 상호절충의 과정에서 특정 변수값의 변화에 대한 영향을 사용자가 점검하고, 사용자의 결정을 받아들인다.



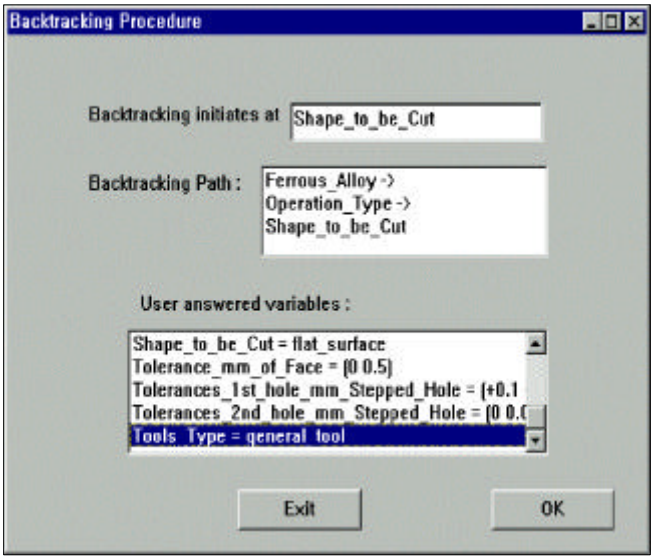
[그림 8] 시스템 아키텍쳐

4.2 예제화면

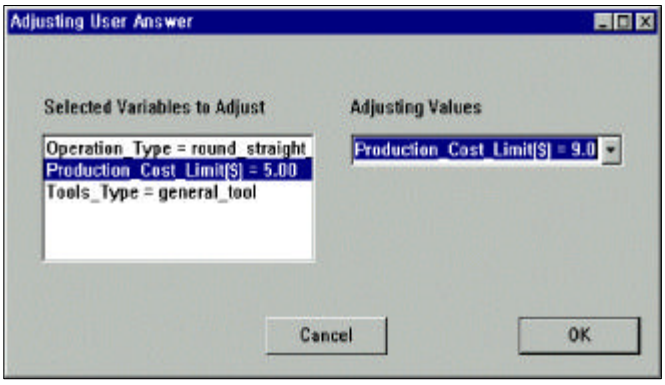
다음은 구축 중인 프로토타입 시스템의 예제화면이다. [그림 9]는 가공하고자 하는 부품의 형상을 CAD 시스템에서 받아 사용자에게 보여주는 것이다. [그림 10]과 [그림 11]은 최하위 계층의 추론에서 막다른 길에 도달하였거나 불일치가 발생했을 때 되돌림추적 과정을 보여주며, 사용자가 자신이 입력한 값을 조정하여 불일치를 해결해 나가는 화면이다.



[그림 9] 예제화면 1



[그림 10] **예제화면** 2



[그림 11] **예제화면** 3

5. 결론 및 추후 연구방향

제조업에 있어서, 공정계획과 재료의 선택은 그 문제의 복잡성과 계층적 성격으로 인해서 더 이상 현장의 실무 전문가들의 수작업에 의존할 수 없게 되었다. 가능한 해를 찾는 것도 쉽지 않으며, 공정대안 간의 비교도 어렵고, 상황의 변화에 대한 공정수정의 가능성과 그 영향을 파악하기도 어려웠다.

본 연구는 현장의 이러한 어려움을 극복하기 위한 방안으로 설계 요구조건, 설계요구 조건을 만족하는 재료지식(재료 특성), 그리고 계층적 공정 지식을 모두 반영하는 공정계획수립 방법론을 제시하였다. 특히 공정 대안의 비용 측면에서의 비교가 가능해 졌으며, 상호절충 과정의 지원으로 주요 결정변수의 변화에 대한 영향력을 사전에 시뮬레이션 할 수 있게 되었다. 계층적 지식과 추론의 방법론은 계층적 성격의 다른 문제에도 적용되리라 기대되며,

공정계획의 문제에서 공구나 인력의 자원 최적화 관리기능을 추가하여 최적화 요소와의 결합도 가능하리라 기대한다.

참고문헌

Beiter, K., S. Krizan, K. Ishii, "Hyper Q/Plastics: An Intelligent Design Aid for Plastic Material Selection," *Advanced in Engineering Software*, Vol.16 (1993) 53-60

Bock, L., "Material-Process Selection Methodology: Design for Manufacturing and Cost using Logic Programming," *Cost Engineering*, Vol.33, No.5 (1991)

Dong, Jian, Hamid R. Parsaei, Herman R. Leep, "Manufacturing Process Planning in a Concurrent Design and Manufacturing Environment," *Computers Industrial Engineering*, Vol.30, No.1, (1996) 83-93

Evbuomwan, N.F.O., S. Sivaloganathan, and A. Jebb, "Concurrent Materials and Manufacturing Process Selection in Design Function Deployment," *Concurrent Eng.: Research and Application*, Vol.3, No.2, (1995) 134-144

Lee, Jae Kyu and Suhn B. Kwon, "ES* : An Expert Systems Development Planner Using A Constraint and Rule-Based Approach," *Expert Systems with Application: An International Journal*. Vol.9 No.1, (1995) 1-14

Lee, Y.B, Jae Kyu Lee, and Suhn B. Kwon, "Concurrent Selection of Materials and Manufacturing Processes using Constraint-Rule Satisfaction Approach," *Proceeding of Korea IE Fall Conference*, (1997) session 8-1

Prabhu P., Wang H. P., "Algorithms for Computer-Aided Generative Process Planning," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.6 No.1, (1991)

Younis, M. A., Abdel Wahab, "A CAPP Expert System for rotational Components," *Computers Industrial Engineering*, Vol.33, No.3-4, (1997) 509-512

Zhang, K.F. and Wright A. J., "A Feature-Recognition Knowledge Base for Process Planning of Rotational Mechanical Components," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology* (1989)