

공정계획과 재료선정의 동시적 해결을 위한 계층구조 전문가시스템

권순범* · 이영봉** · 이재규***

A Hierarchical Expert System for Process Planning and Material Selection

Suhn Beom Kwon* · Young Bong Lee** · Jae Kyu Lee***

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 propose 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 is also used to adjust 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 precedence. 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 developed the prototype system using visual C++ MFC, UNIK, and UNIK-CRSP on PC.

Keywords: expert system, process planning, CRSP

* 단국대학교 경영정보학과 교수

** 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(공정의 선정과 순서의 결정)과 재료의 선택이 이루어지는 것이 제품 제조의 일반적인 절차이다. 지금까지 공정계획과 재료의 선택은 현장 실무 전문가들이 오랫동안의 현장 경험과 지식을 이용해 이루어져 왔다. 그러나, 대개의 경우 전문가 개인의 경험에 의존하여 하나의 해만이 제시되었으며, 제시된 해를 다른 해와의 비교를 통한 우월성 검토가 어려웠다. 또한 상황 변화(공정의 조정, 재료의 교체, 등등)에 대해서 신속하게 새로운 해를 구하는 것도 불가능했다. 여러 가지 대안에 대한 비교와 상황 변화에 따른 해의 조정은 고려 대상 문제인 공정설계와 재료 선택의 두 문제를 동시에 고려해야 가능하다. 지금까지 동시 고려가 어려웠던 이유는 설계 요구 조건, 설계요구 조건을 만족하는 재료지식(재료 특성), 그리고 공정설계 지식을 구성하는 요소들 간의 관계가 복잡하기 때문에 전문가 개인이 전체 문제와 복잡한 관계를 파악하기 어려웠기 때문이다. 따라서, 시스템적으로 어느 정도 만족할 만한(satisfiable) 해를 보장해 주면서 상황의 변화에 따른 새로운 해를 신속하게 제공하는 방법론이 요구된다.

과거 전문가 시스템 기법으로 재료선정 문제를 해결하는 여러 시도가 있었으며(Bergamaschi, et al. 1989; Bullinger et al. 1991; Darmody and Chadwick 1987), 공정계획 문제를 전문가시스템 기법으로 해결하는 연구도 있었다(Chase and Greenwood, 1990; Yu et al. 1993). 또한 공정계획 문제와 재료선정 문제를 동시에 고려하여 해결하고자 하는 시도는 Bock(1991)과 Evuomwan et

al(1995)에 의해서 제시되기도 하였다. 그러나, 고려 요인간의 관계의 표현에 있어서 규칙(rule) 표현만을 사용함으로써 단방향성의 추론만이 가능하며, 상황변화에 대한 반영이나 상호절충(trade-off)이 불가능하였고, 공정계획의 일반적 특성인 계층적 특성을 반영하지 못했다.

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 추론 구조를 갖는 전문가 시스템을 제안한다. 세부적으로 공정의 결정은 설계요구사항과 전문가의 지식에 의해서 결정되며, 이 때에 결정된 변수의 값에 따라서 재료가 동시에 선택되고, 선택된 재료는 다시 가공방법 등의 다른 결정요소에 영향을 미친다. 또한 결정 변수들(재료선택, 가공방법 등)이 정해짐에 따라서 발생하는 비용도 계산되어 공정과 재료비용을 얻을 수 있다. 이러한 상호 연관되어 있는 변수간의 복잡한 관계를 표현하는 것과, 표현된 지식을 이용하여 해를 찾아 주는 것, 그리고 여러 결정 요소 간의 값 조정을 통한 상호절충(trade-off)이 가능하도록 하는 프레임워크를 제안한다.

본 연구에서는 자동차 엔진 부품인 피스톤 봉치의 피스톤 덮개 부품(그림 1)에 대한 재료선택과 공정계획 문제(이후 '예제문제')를 예로 설명한다. 전문가시스템 개발 도구인 UNIK, 제약과 규칙만족문제의 해결 도구인 UNIK-CRSP, 그리고 Visual C++ MFC를 이용하여 프로토타입 시스템을 개발하였다. 제조 공정이 요구되는 분야에서 본 연구의 결과를 이용하여 공정계획과 재료선택문제의 만족할 만한 해를 얻어 공정의

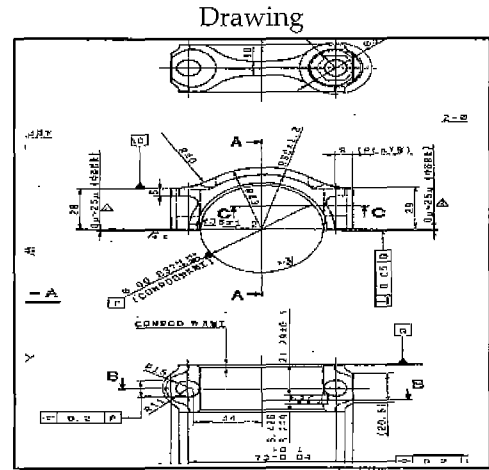
단축과 비용 절감이 가능하리라 기대한다.

2. 문제의 특성과 기존연구

2.1 문제의 특성

첫 번째 문제의 특성은 고려해야 하는 요소가 많다는 것이다. 공정계획과 재료선정의 문제에 있어서 고려해야 하는 요인은 크게 네 가지 정도로 구성된다. 첫째는 설계요인이다. [그림 1]의 도면은 제품 설계가 완료된 결과물로서 제품의 모양, 길이, 폭, 크기 등을 나타내는 형상정보를 보여준다. 제품의 형상정보와 더불어 제품의 설계 시에 제품의 강도(hardness)나 표면 거칠기(surface roughness)에 대한 요구 사항도 기술된다. 이러한 형상정보와 요구사항은 제품 전체에 걸쳐서 동일한 것이 아니라, 제품을 구성하는 연관된 부품에 대해서 서로 다르게 정의, 요구된다.

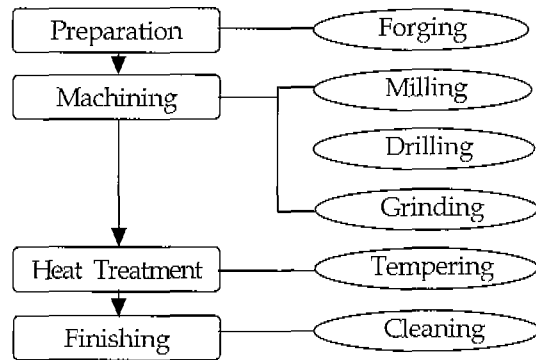
둘째는 재료 특성으로 부품에 사용되는 기본 물질(raw material), 화학적 구성성분(chemical composition), 강도, 용접가능성(weldability) 등이 이에 해당된다. 셋째는 공정요인으로 계층적 공정관계, 공정간의 선후관계(precedence), 그리고 공정을 구성하는 작업 특성과 작업에 쓰이는 기계의 특성도 공정결정에 영향을 미치게 된다. [그림 1]의 아래 부분은 예제문제의 제품을 제조하기 위한 재료(AISI 4140)와 상위 공정과 그 하위에 요구되는 작업의 계층적 구조를 보여주고 있다. 전체적으로 준비(Preparation), 기계작업(Machining), 열처리(Heat Treatment), 마무리(Finishing) 공정으로 구성되어야 하며 각각의 공정에는 하위 작업이 결정되어야 한다. 예를 들면, 준비작업에는 자르기(Pre-cutting), 단조(forging), ঢeki(casting) 등



Material Selection

Material: AISI 4140

Process Planning



(그림 1) 문제의 기술

의 작업이 있을 수 있으나 예제문제에서는 단조 작업만이 필요함을 알 수 있다. [그림 1]의 아래 부분과 같은 공정구성과 재료선택이 지금까지는 전문가의 경험에 의해서 이루어 졌다. 네 번째 요소는 비용과 시간으로 어떤 재료, 어떤 가공 기계를 이용하여 어떤 순서로 가공하는가에 의해서 비용과 소요시간이 결정된다. 비용과 시간은 공정계획과 재료선택에 따른 결과적인 요소로

볼 수 있으나, 실제의 기업 환경에서는 비용이나 시간이 가장 엄격히 지켜야 할 초기 제약으로 작용하기도 한다.

두 번째 문제의 특성은 위에서 열거한 여러 요인이 서로 복잡하게 영향을 미치고 있다는 것과 그에 따라서 여러 요인에 대한 의사 결정이 동시에 결정되어야 한다는 것이다. 예를 들면, 제품의 형상에 따라서 가공방법과 사용될 기계가 결정되며, 강도나 표면 거칠기 요구사항에 따라서 재료가 결정된다. 반대로, 재료의 강도에 따라서 사용될 기계와 작업이 결정되기도 하는데, 예제문제에서 처럼 재료가 크롬 합금인 AISI 4140 이라면 가공방법은 단조이어야 한다. 롤링(rolling) 가공방법이 요구된다면, 롤링으로 처리할 수 있는 재료는 상당히 제한적이다. 이같이 위에 열거한 설계, 재료, 공정 요인이 서로서도 호환성(compatibility)관계나 인과(causal)관계로 연관되어져 있기 때문에 어느 한 요소가 변경되면 나머지 모든 요소에 영향을 미치게 되고 그 영향은 관련된 관계를 따라서 퍼져나가게(propagate) 된다. 시간과 비용 요소는 세 가지 요소가 결정됨에 따라 공정 시간과 재료비용, 작업 비용 등이 결정된다. 그러나 실제 상황에서는 해당 제품의 가공은 작업장에 배당된 일련의 작업 과정 중에 한 부분을 차지하게 되므로, 보통은 총 작업 시간에 제약을 두게 된다. 따라서 총 작업 시간을 초과하는 경우는 작업시간의 단축을 위해서 공정시간이 단축될 수 있는 가공방법이나 기계가 선택되어야 한다. 또한 비용의 제약이 있는 경우에는 숙련된 작업자가 요구되거나 고가의 기계 보다는 작업단가를 낮출 수 있는 작업과 기계가 선택되어야 한다. 시간이나 비용 제약의 해결은 기술적이나 물리적으로 가능한 해를 얻은 뒤에 상호절충의 과정을 거쳐서 해결할 수 있다.

2.2 기존연구

설계된 제품에 대한 적절한 재료를 선정하는 문제를 전문가시스템으로 해결하고자 하는 연구는 여러 학자에 의해서 이루어 졌는데(Bergamaschi, et al. 1989, Bullfinger et al. 1991, Darmody and Chadwick 1987), 주로 전문가시스템의 규칙 표현을 이용하여 요구사항을 만족하는 재료를 데이터베이스에서 선정해 주는 것이었다. 또한 제품 생산을 위한 공정의 선택과 순서결정 문제의 해결을 위해서도 전문가시스템의 기법이 활발히 활용되었다(Chase and Greenwood, 1990; Yu et al. 1993). 컴퓨터 지원 공정계획(CAPP: Computer-Aided Process Planning) 분야는 여러 상황(job-shop, flexible manufacturing system)에서의 다양한 연구가 이루어 졌는데, 도메인의 특성이나 제품의 특성에 따른 공정의 선택과 순서의 결정을 규칙 형태의 지식으로 표현하여 해결하였다.

공정계획과 재료의 선정은 순차적으로 이루어지는 것이 아니라 서로 영향을 주고 받으면서 동시에 결정되어야 하는 상황이 많기 때문에 이에 대한 연구가 이루어 졌다(Bock, 1991; Evuomwan et al 1995). 그러나, Bock의 방법은 공정간의 순서결정을 위한 전문가의 지식을 나타내고 추론하여 공정을 먼저 결정하고 재료를 나중에 선택하는 순차적 방법으로 동시에 상호작용을 반영하지는 못했다. Evuomwan은 재료의 선택이 제조 공정 계획에 미치는 영향을 규칙으로 표현하여 공정계획 수립에 전문가시스템 기법을 도입하였으나, 역시 재료의 선택과 공정계획 간 서로 영향을 미치는 양방향적 관계가 반영되지 않았다. 또한 두 방법 모두 고려 요인간의 관계의 표현에 있어서 규칙(rule)표현만을 사용함으로써 단방향성의 추론만이 가능하며, 상황변화에 대한 반영이나 상호절충(trade-off)이 불가능한 방법이다.

[표 1] 기존연구와의 비교

기능 \ 기존연구	Bock (1991)	Evuomwan (1995)	Lee et al (1997)	Proposed
Rule	○	○	○	○
Numerical Constraints	○	○	○	○
Symbolic Constraints	○	×	○	○
Process Hierarchy	×	×	×	○
Concurrent Decision	×	×	○	○
Alternatives	×	○	○	○
Trade-off	×	×	○	○

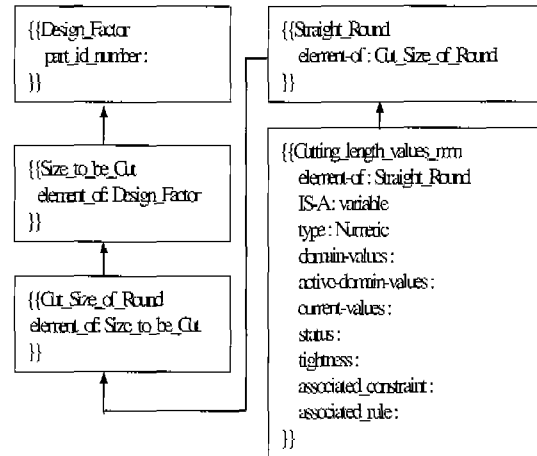
재료선정과 공정계획의 양방향적 특성을 고려하기 위한 제약규칙만족기법(CRSP: Constraint and Rule Satisfaction Problem)을 이용한 연구도 있었으나(Lee et al. 1997), 공정계획의 계층적 특성이 반영되지 않았다. 공정계획에 있어서는 하나의 상위 공정과 그 상위공정을 구성하는 작업은 계층적 관계를 이루며, 재료의 선택은 상위공정이나 하위 작업 모두에 영향을 받거나 미치게 되는 것이 제조 공정의 일반적인 특징인데, 세 방법론 모두 이러한 계층적 특성을 반영하지 못했다. 위의 [표 1]은 각 방법론의 특징을 비교한 것이다.

3. 변수와 지식의 표현

앞서 설명한 특성을 갖는 문제를 해결하기 위해서는 문제를 구성하는 변수와 문제의 구조적 지식이나 전문가의 지식을 표현해야 한다. 예제 문제의 변수와 지식은 크게 네 가지로 구분할 수 있다.

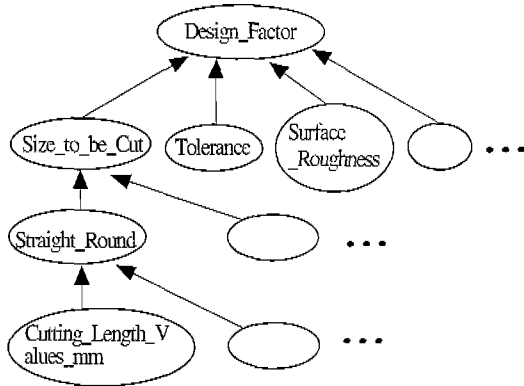
3.1 설계변수

설계변수는 부품의 형상, 가공치수, 가공 면의



[그림 2] 설계변수의 프레임 표현

표면조도와 공차, 물리적 성질, 기계적 성질, 부품의 열처리 요구사항 등의 설계요구사항을 나타낸다. 각각의 설계변수는 객체로서 프레임으로 표현될 수 있다. 변수(프레임)와 변수 간의 관계 중의 하나인 소속관계(IS-A, element-of)를 이용하여 설계변수 간의 상 하위 개념(소속관계)을 구조화 할 수 있다. [그림 2]는 전체 부품의 한 부분에 대한 설계 요구사항 중 형상, 즉 가공수치에 대한 설계변수 들을 표현한 것이다. 최상위에 있는 설계 변수인 'Design_Factor'는 식별할 수 있는 하나의 아이디어를 속성값으로 갖고 바로 아래의 하위 변수로 'Size_to_be_Cut'이라는 변수(프레임)를 갖는다. 다시 'Size_to_be_Cut' 변수는 하위변수로 'Cut_Size_of_Round'를 갖는 변수 간의 관계 구조를 나타내고 있다. 최하위에 있는 설계 변수인 'Cutting_Length_Values_mmm' 프레임에는 슬롯에 가공 수치를 나타내는 구체적인 수치가 기록되며, 'domain-values'에서 'associated_rule'까지의 슬롯은 추론과정에서 발생하는 변화사항을 기록하여 추론을 통제하기 위해 미리 준비되어 있는 슬롯들이다. [그림 3]은 전체적으로 상위 개념의 변수 밑에는 여러 하위 변수가 있



(그림 3) 설계변수 간의 관계

는 트리 구조임을 보여주고 있다.

3.2 공정변수와 지식

공정지식은 주로 현장전문가의 지식을 규칙의 형태로 표현한 것으로, 규칙의 조건부는 설계요구 사항(설계변수)과 재료변수이고, 결론부는 공정의 집합이다. 공정지식은 ‘공정순서 규칙’과 ‘공정포함 규칙’의 두 가지 종류가 있다. 공정순서 규칙의 결론부에는 공정의 집합이 오는데(그림 4 참조) 하나의 공정 집합에 속한 공정들은 선택된 공정으로 가공순서를 의미한다. 공정포함 규칙의 결론부에도 공정의 집합이 오는데(그림 5 참조), 순서는 의미 없고 집합에 속한 공정이 포함되어야 함을 의미한다. [그림 4]의 ‘공정순서 규칙24’는 자르는 모양과 마무리 요구사항, 그리고 재료의 종류가 주어진 조건을 만족하면 Preparation, Machining, Finishing 세 개의 공정이 제시된 순서대로 진행되어야 함을 의미한다. [그림 5]의 ‘공정순서 규칙25’는 표면 거칠기, 내성(tolerance), 강도, 부품의 모양, 자르는 면의 모양이 주어진 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 4) 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 5) 공정지식(공정포함 규칙)

3.3 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.

제약은 변수와 변수 간의 관계를 규정하는 것으로, 여러 가지 관계 중에서 본 논문에서 사용되는 제약 표현으로는 호환성(compatibility), 부등(inequality), 함수적 할당(functional assignment) 그리고 등호(equality)관계를 이용한다. [그림 6]은 제약의 여러 형태 중에서 부등관계로 재료의 인장강도(재료 변수 값)가 설계요구 사항의 인

```

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

[그림 6] 재료지식(부등관계 제약)

```

{{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 8] 비용지식

```

{{ Constraint53
  IS-A constraint
  type: value_compatibility
  associated_variables: Ferrous_Alloy RM_Tensile_Strength RM_Yield_Strength
                    RM_Toughness RM_Hardness_BHN
  Value-set:
    (st_1035 49 25 2.1 225) (st_4027 56 35 4.1 226)
    (st_4012 56 35 4.1 228) (st_4615 60 37 9.0 229)
    (st_4718 70 47 7.0 230) (st_4140 40 90 5.0 245)
    (st_4340 70 50 8.5 248)
}}
    
```

[그림 7] 재료지식(호환성관계 제약)

장강도(설계 변수 값)보다 크거나 같아야 한다는 제약이다.

[그림 7]은 호환성 관계를 나타내는 제약으로 재료가 철이 함유된 합금의 경우, 합금의 종류에 따라서 인장강도나 거칠기 등의 특성 값을 나타내는 것이다. 재료(합금의 종류)가 결정되어서 그에 따른 인장강도나 거칠기가 결정될 수도 있고, 반대로 가공 방법이 먼저 결정되어서 가공 방법에 따른 가공 가능한 재료의 인장강도 등의 재료 특성 값이 결정될 수도 있다.

3.4 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 연

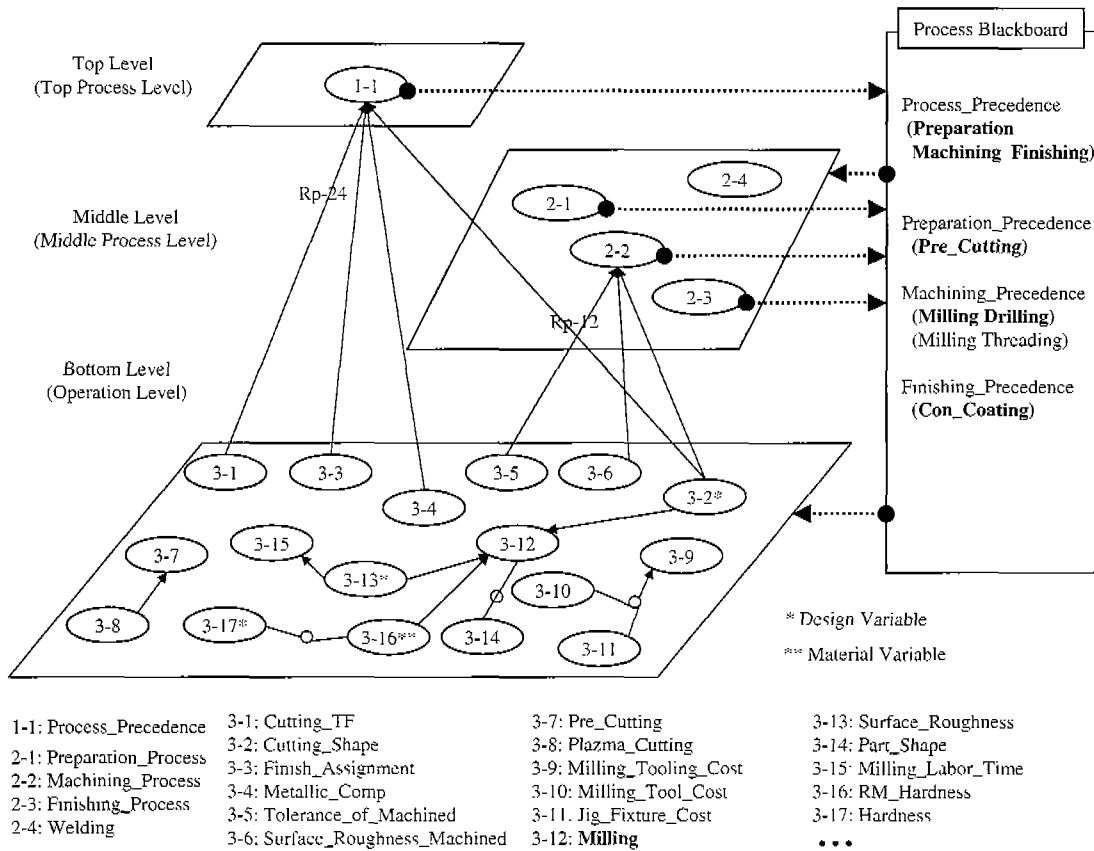
결되어 최종적으로 전체 가공비용이 계산된다. [그림 8]은 milling의 tooling 비용을 계산하는 제약과 변수(milling_tool_cost)이다. 가공 시간에 대해서도 비용과 같은 방법으로 시간 변수와 계산할당 제약을 이용하여 총 가공시간이 계산될 수 있다.

3. 계층 구조

표현된 변수와 지식을 이용하여 추론을 하기 전에 앞서 본 문제의 특성인 계층적 구조에 대한 분석과 이에 따른 추론방법이 설계되어야 한다. 왜냐하면 공정계획 문제는 일반적으로 계층적 구조를 갖기 때문이다. 피스톤 덮개 부품의 예에서는 크게 공정계층과 작업계층으로 나눌 수 있고, 공정계층을 다시 두 개의 계층으로 나누었다. 대상 제품의 특성에 따라서 공정 계층이 3개 이상의 계층도 가질 수 있다. 본 논문에서 제시하는 계층적 방법론은 공정계층의 하위 계층의 추가만으로 제조공정과 재료선택의 문제를 해결할 수 있는 틀을 제공한다. [그림 9]는 피스톤 덮개 부품 제조공정에 대한 변수와 지식의 일부분으로 3계층을 나타내는 그림이다.

3.1 최상위 계층

최상위 계층에서는 최상위의 공정선택과 순서가 결정된다. 현장 전문가의 지식을 표현한 공정순규칙이 추론 되어 공정이 결정된다. [그림 9]의



(그림 9) 계층적 지식과 공정흑판

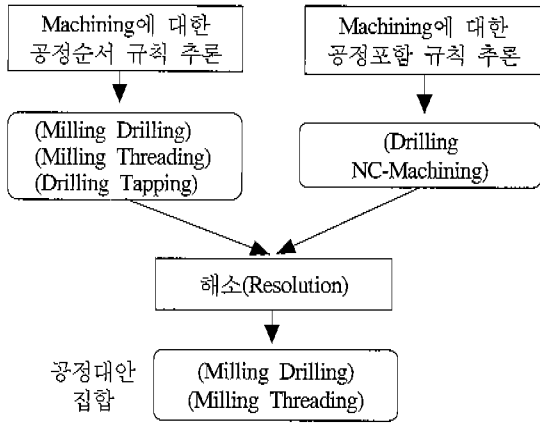
예에서는 최하위 계층의 변수 값들에 의해서 공정순서 규칙-24(Rp24)가 추론 되어 (Preparation, Machining, Finishing)의 공정이 선택되고 동시에 순서가 결정되었다(그림 4)의 규칙-24 참조). 이 결과는 오른쪽의 공정 흑판(process blackboard)에 기록되고, 다음 계층의 공정 결정을 위한 추론에 사용된다. 예제문제에서 최상위 공정의 결정과 관련된 규칙은 모두 26개이며, 결론변수는 Process-precedence라는 동일한 변수를 갖는다.

3.2 중간계층

중간 계층에서는 최상위 계층에서 결정된 공

정 순서대로 종속된 하위 공정 순서를 결정한다. [그림 9]의 예에서 최상위 공정이 Preparation -> Machining -> Finishing이므로, Preparation의 하위 공정인 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.

공정계획에 사용되는 규칙에는 '공정순서 규칙'과 '공정포함 규칙' 두 가지 종류가 있다. 예제문제의 최상위 계층에서는 '공정순서 규칙'의 추론 만으로 최상위 공정을 얻었지만 두 가지



[그림10] 해소과정과 공정대안의 도출

종류의 공정 순서 규칙이 동시에 추론되는 경우, 다음과 같은 해소(resolution)과정이 필요하다[그림 10]. 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 해소과정을 거쳐 공정대안 집합을 형성하게 된다.

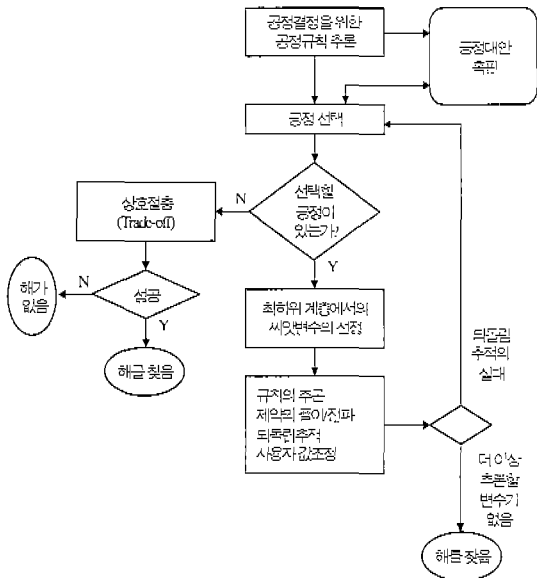
공정대안 집합은 공정목록에 기록되고, 공정대안 중에서 사용자는 적절한 대안을 선택하고, 선택한 공정으로 다음의 하위 공정 계층을 추론하게 된다. 예제문제의 최상위 계층에서는 공정순서 규칙만 있어서 공정해소 과정이 필요 없었으나, 가공 제품에 따라서는 최상위 계층에서도 이러한 공정해소 과정이 요구될 수도 있다. 또한 예제문제에서는 중간계층이 하나이지만 두 개 이상일 수 있으며, 이 경우에 추론 과정은 동일한 방법을 적용한다.

3.3 최하위 계층

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

최하위 계층의 씨앗변수에서부터의 추론은 여러 결정변수 간의 복잡한 관계를 표현한 제약과 규칙을 만족하도록 하는 제약규칙만족풀이 기법을 이용한다(Lee and Kwon, 1995). 기존의 제약풀이 만족 기법과의 차이점은 씨앗변수 간에 우선 순위가 있다는 것으로 순위가 앞선 변수와 관련된 제약과 규칙이 모두 추론 되고 나서 다음 순위의 씨앗변수와 관련된 제약과 규칙이 추론 된다는 점이다. 즉, 기존의 제약규칙 만족기법에 순서가 있는 추론방법(순서를 갖는 제약규칙만족 기법: Ordered CRSP)이다.

최하위 계층에서 순서를 갖는 제약규칙만족풀이로 공구, 가공방법 등이 결정되며 이 것은 변수의 변수 값이 결정되는 과정이다. 따라서 비용 변수와 지식에 의해서 가공비용이 계산된다. [그림 9]에서 보듯이 최상위와 중간 계층의 공정수립을 위한 공정규칙은 조건부 변수가 최하위계층에 있는 변수들이므로 최하위 변수의 일부는 이미 변수 값이 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 되돌림추



[그림 11] 계층추론 알고리즘의 흐름도

적(backtracking)방법과 사용자 답변의 재조정을 이용하여 최하위 계층 내에서 해결을 시도한다 (Lee and Kwon, 1995).

3.4 계층추론 알고리즘

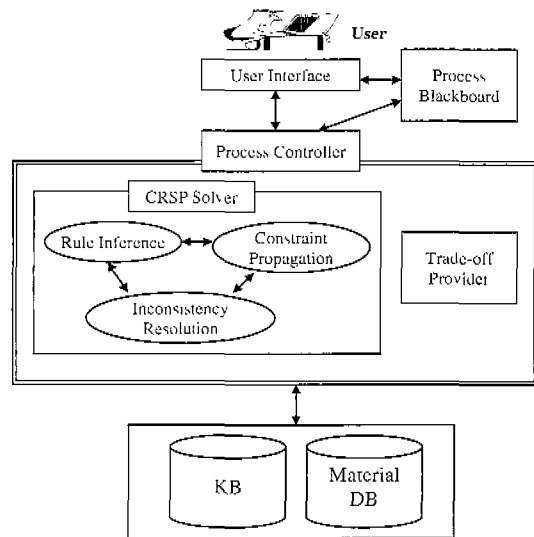
[그림 11]은 계층추론 알고리즘의 흐름도 이다. 최상위 계층에서부터 공정결정을 위한 추론이 시작되고, 선택된 공정은 공정후판에 기록된다. 최하위 계층에서의 추론은 순서를 갖는 제약규칙만족 기법으로 시행된다. 막다른 길이나 불일치 상황이 발생했으나, 되돌림추적이거나 사용자 답변의 재조정으로 해소되지 않으면, 공정대안 후판을 참조하여 바로 위 계층의 공정대안이 남아있는 가를 검토한다. 만약, 남아 있으면 남아 있는 공정대안을 새로운 공정으로 선택하여, 최하위 계층의 추론을 반복한다. 만약, 공정대안 후판에 바로 위 계층의 공정대안이 더 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 아키텍처와 예제화면

4.1 시스템 아키텍처

[그림 12]는 프로토타입 시스템의 아키텍처이다. 계층별 공정선정 후에, 선정된 공정대안을 여러 서브시스템이 공유하기 위해서 흑판(blackboard)이 도입되었으며, 공정 제어모듈이 계층별 추론을

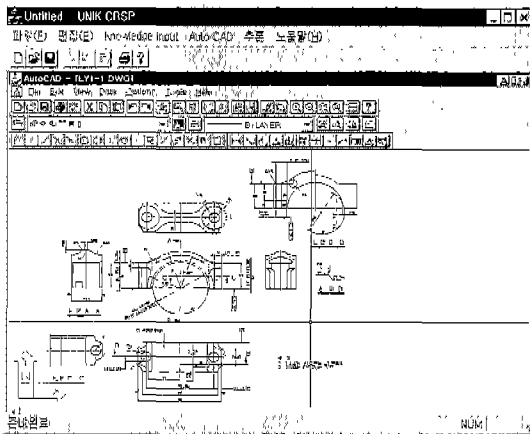


[그림 12] 시스템 아키텍처

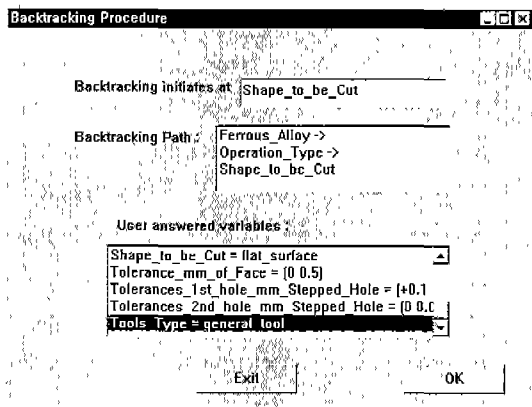
제어한다. 사용자는 추론의 진행상황을 점검할 수 있고, 추론 중인 공정에 대해서 비용과 재료 등의 주요 결정변수의 값을 점검할 수 있다. 특히 상호결충의 과정에서 특정 변수 값의 변화에 대한 영향을 사용자가 점검하고, 사용자의 결정을 받아들인다.

4.2 예제화면

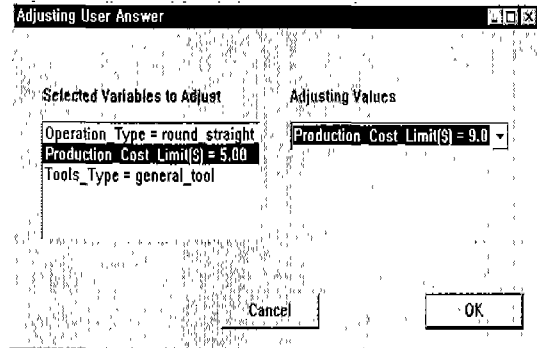
다음은 프로토타입 시스템의 예제화면이다. [그림 13]은 가공하고자 하는 부품의 형상을 CAD 시스템에서 받아 사용자에게 보여주는 것이다. [그림 14]와 [그림 15]은 최하위 계층의 추



[그림 13] 예제화면 1



[그림 14] 예제화면 2



[그림 15] 예제화면 3

론에서 막다른 길에 도달하였거나 불일치가 발생했을 때 되돌림추적 과정을 보여주며, 사용자가 자신이 입력한 값을 조정하여 불일치를 해결해 나가는 화면이다.

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, 상호결충 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.

참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] Bergamaschi, S., G. Gombarda, L. Piancastelli and C. Satori, "An Expert System for the Selection of a Composite Material," 2nd Int'l Conf. on Data and Knowledge System for Manufacturing and Engineering, (1989)
- [3] Bock, L., "Material-Process Selection Methodology: Design for Manufacturing and Cost using Logic Programming," *Cost Engineering*, Vol.33, No.5 (1991)
- [4] Bullinger, H.S., J. Warscht and D. Fischer, "Knowledge-based System for Material Selection for Design with New Materials," *Knowledge-based Systems*, Vol.4 No.2, (1991) 95-101
- [5] Chase, K.W. and Greenwood W.H., "Least Cost Tolerance Allocation for Mechanical Assemblies with Automated Process Selection," *Manufacturing Review*, Vol.3 No.1, (1990) 49-59
- [6] Damody, M. and G. Chadwick, "Optimization Material Selections for Performance and Supportability with an Expert System," 3rd Conf. of Annual ES in Government, (1987)
- [7] 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
- [8] 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
- [9] Lee, Jae Kyu and Suh 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
- [10] Lee, Y.B., Jae Kyu Lee, and Suh B. Kwon, "Concurrent Selection of Materials and Manufacturing Processes using Constraint-Rule Satisfaction Approach," *Proceeding of Korea IE Fall Conference*, (1997) session 8-1
- [11] Prabhu P., Wang H. P., "Algorithms for Computer Aided Generative Process Planning," *Int. J. of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.6 No.1, (1991)
- [12] Younis, M. A. and Abdel Wahab, "A CAPP Expert System for rotational Components," *Computers Industrial Engineering*, Vol.33, No.3, (1997) 509-512
- [13] Yu Jyh-Cheng, Steven Krizan and Koshuke Ishii, "Computer Aided Design for Manufacturing Processes Selection," *J. of Intelligent Manufacturing*, Vol.4, (1993) 199-208
- [14] 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)