

자동공정계획의 접근 방법

김호룡 · 서효원 · 김인태 · 박철우 · 한봉주

Approaches for Automated Process Planning

Ho-Ryong Kim · Hyo-Won Suh · In-Tae Kim

Chul-Woo Park · Bong-Joo Han



- 김호룡 (연세대 기계설계학과)
- 1947년생
- CAD/CAM을 전공하였으며, 설계 자동화, 자동공정계획, 설계최적화에 관심을 가지고 있다.



- 서효원 (생산기술연구원 생산시스템 개발센터)
- 1957년생
- 동시공학을 전공하였으며, 동시공학, CAPP, Feature, CIM 분야에 관심을 가지고 있다.

1. 머리말

컴퓨터의 발달에 따라 설계와 생산의 각 분야에서 놀랄 만한 발전이 있었다. CAD 시스템의 발달에 따라 짧은 시간에 복잡한 부품의 설계도 단시간에 행할 수 있게 되었으며, 수치제어 공작기계와 CAM 시스템의 발달로 고정밀도의 가공이 용이하게 되었다. 그러나 이러한 발전은 전체적인 설계 생산의 과정에서 각 단계별 부분적인 자동화를 목표로 하였으므로, 부분적인 자동화를 이룩하였을 뿐 전체적인 과정에서의 통합적인 자동화는 이룩하지 못하였다. 즉, 설계와 생산의 두 영역이 각기 발전하여 놀랄 만한 진보를 이루었지만, 이들 사이의 연결은 아직 미흡한 상황이다.

공정계획은 설계와 생산의 전 과정에서 상당 부분을 차지하며, 상당한 시간과 전문적인 지식과 경험이 요구된다. 최근에는 생산 형태의 변화에 따른 리드타임(lead time)의 단축, 전문가의 부족 현상 등과 함께 CAD/

CAM 시스템의 대량 보급에 따른 상대적인 낙후성등을 해소하기 위해 설계정보를 단시간 내에 효과적으로 가공정보로 변환하여 줄 수 있는 컴퓨터 원용공정계획(CAPP: computer aided process planning) 시스템의 개발이 필연적인 과제로 대두되었다.

공정계획은 변환적 방법에서 창생적 방법을 거쳐 현재는 인공지능 기법에 의한 전문가 시스템에 관한 연구가 활발하다. 설계와 생산은 인간의 고도의 지적 활동이므로 이러한 지적인 능력을 컴퓨터에 의해 처리하기 위한 방법으로 지식 기반을 바탕으로 한 연구가 수행되고 있다.

2. 자동 공정계획(CAPP)

2.1 공정계획의 정의 및 기능

공정계획(process planning)이란 설계와 생산의 연결을 위한 과정으로 제품에 관한 설계 정보와 원자재, 생산 설비, 작업자 등의 가용 자원에 관한 정보를 기초로 제품을

경제적으로 생산하기 위한 방법의 체계적 결정으로 정의할 수 있으며, 제품 설계를 완료한 다음 설계정보를 바탕으로 최종 제품을 생산하기 위해 일련의 작업에 관한 계획 등 생산정보를 발생시키는 과정이다. 계획(planning)은 주어진 제한 조건(constraint)과 제한된 자원으로 목적을 달성하기 위해 수단을 고안하는 과정으로 목적, 제한 조건, 자원이 3요소가 된다. 공정계획은 작업 현장의 가공기, 공구, 작업자등의 자원을 바탕으로 기능, 정밀도, 가공 기간, 비용 등 제한 조건을 만족하며, 생산정보를 생성하는 과정이다. 기계 가공 분야에서의 공정계획이란 가공공정, 공정 순서, 공작기계, 공구, 치공구, 가공조건 등의 결정을 통하여 공정도를 작성하는 것이다. 제품의 종류와 수량, 재료와 부품의 종류, 현재 가지고 있는 생산설비와 생산기술 등에 따라 다르나, 기본적으로 다음의 두 단계를 포함한다.

①공정설계 (process design)

소재로부터 제품으로 변환하는 전체적인 생산 공정에 관한 거시적 의사결정

②작업설계 (operation design)

각 공정에 포함되어 있는 구체적인 작업에 관한 미시적 의사 결정

공정계획은 설계도면(drawing)의 정보를 바탕으로 가공방법, 가공순서 등 가공을 위한 체계적인 정보를 만드는 과정으로 그림 1은 이에 따른 공정계획 업무 절차이다. 생산 수량, 생산 기간에 따른 생산계획(production plan)적인 요소들이 결정되면 설계도면을 분석하여 각 부위의 기능(function), 정밀도 등을 파악하여 소재 설계를 행한 후 가공부위(machining feature)를 추출하여 각 가공부위의 가공법, 공구, 절삭조건 등 가공 파라미터를 결정하고, 가공부위 정보를 공정(operation) 단위의 정보로 바꾸어 공정목록(operation list)을 작성한다. 그리고 이를 바탕으로 하여 실제 가공에 필요한 생산라인을 구성하고 공정간 상호 관계와 제한 조건

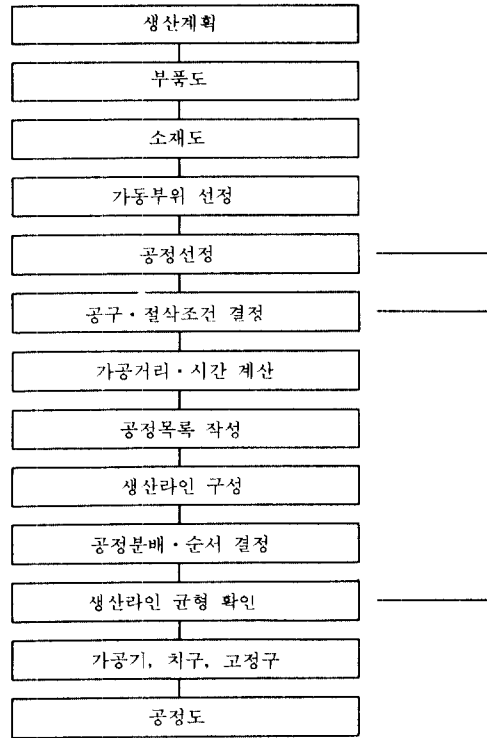


그림 1 공정계획 업무 순서

을 유지하며 각 셋업의 가공기를 결정하고 공정을 분배하여 셋업간·공정간 순서를 결정한다. 이때 생산 라인의 균형문제(line balance)를 고려하여 공정의 분배나 순서를 조절하고 필요한 경우 생산라인의 변경, 공정 공구 절삭 조건을 변경한다. 이상의 작업을 완수하고 치구 고정구 등의 설계를 하여 공정도를 생성한다. 이상과 같은 공정계획 작업의 주요 기능은 다음과 같다.

- ▷ 생산 부품에 대한 설계정보의 해석 (interpretation of product model)
- ▷ 가공공정의 선정(selection of machining operations)
- ▷ 가공공구의 선정(selection of cutting tools)
- ▷ 절삭조건의 선정 및 산출(calculation of cutting conditions)

- ▷ 가공시간의 계산(calculation of the machining times)
- ▷ 셋업의 결정(determination of setups)
- ▷ 가공순서의 결정(sequencing the machining operations)
- ▷ 공작기계의 선정(selection of machine tools)
- ▷ 생산 시간의 계산(calculation of the overall times)
- ▷ 공구경로의 생성(generation of NC tool paths)
- ▷ 공구 및 고정구의 설계(design of tools and fixtures)

2.2 CAPP의 발전 과정

CAPP는 그림 2와 같이 CIM(computer integrated manufacturing)을 실현하기 위해 CAD와 CAM의 두 영역을 연결시키는 과정이다. CAPP 시스템은 변환적 방식(variant approach)에서 시작하여 창생적 방식(generative approach)을 거쳐 현재는 인공지능(AI: artificial intelligence)을 바탕으로 한 전문가 시스템(expert system)에 대한 연구가 활발하다.(그림 3)

1) 변환적 방법

변환적 방법은 최초로 컴퓨터를 공정계획

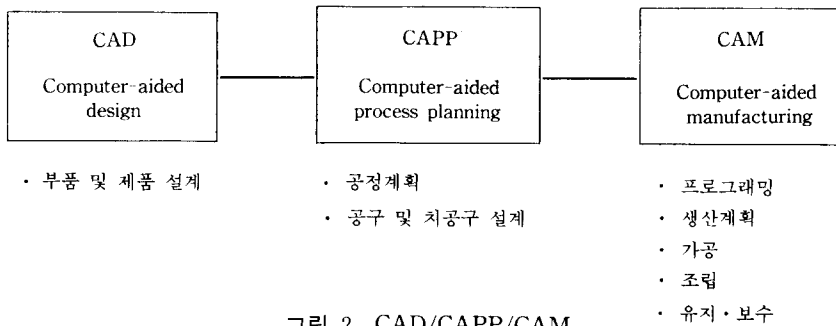


그림 2 CAD/CAPP/CAM

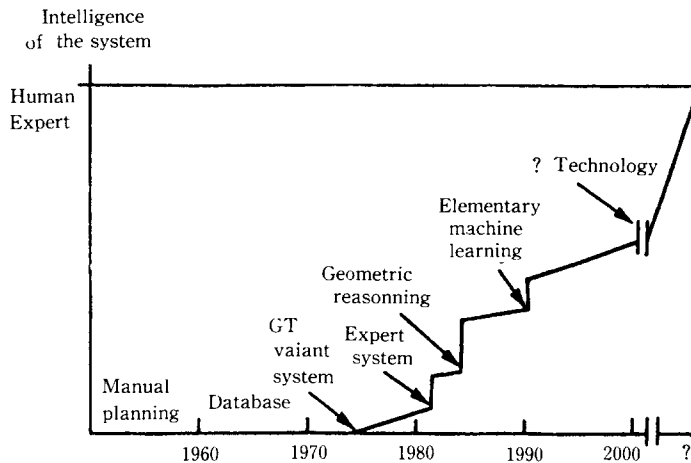


그림 3 CAPP 시스템의 발전 과정

에 적용한 방법이다. 유사 부품은 유사한 공정계획을 갖는다는 개념에 기초하여 그룹 테크놀로지(GT: group technology)를 사용하였다. 부품(part)은 부품군(part family)으로 그룹핑되며, 각 부품군에는 유일한 코드(code)가 부여된다. 각 부품군마다 표준 공정계획을 작성, 저장하였다가 공정계획 수립 시 부여된 부품군의 코드에 따라 개발된 표준 공정계획을 적용한다.

변환적 CAPP시스템은 기존의 생산 방법을 기본으로 하여 이루어지므로 개발과 사용이 용이하지만 생산 설비의 변화, 기술의 변화, 부품 형상의 변화에 대응하는데 어려움이 있다. 이러한 방법의 예로는 CAM-I, CAPP, MIPLAN 등이 있다.^(1~3)

2) 준창생적 방법

변환적 방법의 다음 세대의 시스템으로 변환적 방법과 창생적 방법이 혼합되어 있다. 변환적 방법과 동일하게 부품군이 확인된 후 사용자에게 여러 가지 선택권(option)을 부여한다. 첫번째 선택권은 각 부품군의 표준 공정계획을 변경할 수 있게 하는 것이고, 두 번째는 특정 부품에 대해 불완전한 공정계획에서 시작하여 완성할 수 있게 하는 것이다. 세 번째는 컴퓨터에 저장된 각종 표준 공정계획을 사용하여 처음부터 새로운 공정계획을 완성할 수 있게 한다. 기본적인 방법은 변환적 방법과 동일하며, 이러한 방법의 예로는 ACAPS, GENPLAN, CORE-CAPP 등이 있다.^(1~3)

3) 창생적 방법

창생적 방법의 시스템은 자동적으로 공정정보를 합성하여 부품에 대한 공정계획을 생성하도록 고안되었다. 이러한 시스템은 각 부품의 설계정보에 대한 적절한 기술 방법(part description scheme)과 제조 데이터베이스(MDB: manufacturing data base)를 사용하는 제조논리(manufacturing logic)를 가지고 있다. 초기의 시스템은 제조 논리를 구성하기 위해 의사 결정표(decision table)나

의사결정나무(decision tree)를 사용하였고, 부품의 상세한 표현을 위한 수단으로는 GT 코드나 특별히 개발된 언어를 사용하였다. 변환적 방법에 비해 복잡하여 사용 범위는 제한적이다. 이러한 시스템의 예로는 DCLASS, APPAS, CPPP 등이 있다.^(1~3)

CAD 데이터베이스와 모델링 기법의 등장에 따라 창생적 시스템은 설계정보와의 자동연계가 가능하게 되었다. TIPPS, PRO 등은 초기의 CAD와 창생적 방법을 연결시킨 보기들이다.^(1~3)

4) AI 기법에 의한 방법

창생적 공정계획 방법의 주요한 발전은 공정계획에 지식기반(knowledge-based), 인공지능(artificial intelligence)의 적용이다. 설계와 생산은 인간의 고도의 지적인 활동이므로 일반적인 프로그래밍 방법으로는 처리하기 어려우므로 인간의 지적 기능을 공정계획 분야에 적용하기 위해 인공지능 기법을 채택하였다. 공정계획 분야는 상당한 양의 전문지식의 처리를 요구하기 때문에 CAPP 개발에 있어 큰 비중을 차지하게 되었다. GARI⁽⁴⁾는 이러한 방식을 사용한 첫 번째 예로 알려져 있으며, 이 밖에 많은 시스템들이 이러한 방식으로 개발되었다. 이러한 시스템들은 전문가 공정계획 시스템(expert process planning system)이라 통칭되며, 이는 지식 표현 방법에 따라 크게 규칙기반 시스템(rule-based system)과 프레임기반 시스템(frame-based system) 등으로 나뉘며 경우에 따라 이 두 가지 모두를 사용하는 경우도 있다. 이러한 시스템의 예로는 APPAS, GARI, TOM, XPLANE, EXCAP 등이 있다.^(1~3)

5) 수학적 기법

공정간 그룹 형성, 공정 순서의 결정 등은 공정계획의 성패에 결정적인 영향을 미친다. 공정계획 과정에는 공정, 공구 등의 다양한 대체안이 존재하며, 공정간 그룹, 가공순서에 따라 비가공시간(공구 교환 시간, 인덱스 시간 등)이 크게 달라진다. 그러므로 이를

최적화 기법 등을 이용하여 최적화하려는 연구가 수행되고 있다.^(2,3)

2.3 CAPP 시스템 개발 현황

기존의 개발된 대부분의 CAPP 시스템은 변환적 접근 기법을 사용하였으며, 1980년대 초부터 창생적 접근 기법을 사용하여 CAPP 시스템들이 개발되었다. 그러나 창생적 접근 기법이 공정계획 전문가의 행위와 유사하게 공정계획을 수립하기 위해서는 기술적인 정보가 포함되어 있는 제조 데이터베이스를 구축해야 하며, 의사 결정을 수행할 수 있는 논리를 개발해야 한다. 또한 CAPP 시스템의 입력 정보인 제품의 설계 정보가 공정계획의 기능을 수행하는데 부적합하기 때문에 아주 제한적인 형상들에 대해서만 공정계획을 생성하였다.

1980년대 중반부터 보다 지능적이고 통합화된 CAPP 시스템을 개발할 목적으로 AI개념에 의한 CAPP 시스템이 개발되었고, CAD 시스템의 발달과 더불어 CAD 인터페이스된 CAPP 시스템에 관한 연구도 활발히 행해지게 되었다.

지금까지 개발된 CAPP 시스템의 예를 시스템 명칭, 대상 부품, 접근 기법, 시스템의 특징, 개발 연도 및 개발자의 순으로 요약하면 표 1과 같으며, 표 2와 표 3은 공정순서 결정과 셋업 그룹핑 및 셋업간 순서 결정에 관한 수학적 접근 방법 및 휴리스틱에 의한 연구를 요약한 것이다. 위의 시스템중 대표적인 것을 살펴보면 다음과 같다.

1) GARI⁽⁴⁾

GARI 시스템은 인공지능 기법을 이용한 실험적인 시스템으로 지식 베이스와 설계자(planner)로 구성된다. MACLISP 언어를 사용하였고 규칙을 기반으로 하였다. 공정 능력에 관한 규칙과 지식을 다음과 같은 형태로 지식 베이스에 축적한다.

조건 \implies 권고 사항

각 권고 사항에는 중요도를 표시하기 위한 가중치가 할당된다.

부품은 특별한 표기법을 사용해서 기술되며, 이 표기법에는 공작물의 형상, 공차, 표면거칠기 등 최대 20개까지 관련 정보를 포함할 수 있다.

2) SIPP^(2,5)

SIPP(semi-intelligent process planner)는 인공지능 기법을 이용한 공정계획 시스템으로서 지식표현 구조로 프레임(frame)을 사용한다. SIPP 시스템에서 프레임은 부품에 포함되는 다양한 가공면(machinable surface)의 특성에 관한 정보와 가공면의 가공에 이용될 수 있는 공정 능력에 관한 정보의 지식을 나타내는데 이용된다. 이 시스템은 다른 시스템과 비교하였을 때 크게 다른 두 가지는 i) 지식을 규칙 형태로 표현하지 않고, 계층적인 프레임으로 표현하여 문제를 해결하고, ii) 공정 순서를 결정하는데 브랜치 바운드 방법(branch-and-bound)과 최소비용 우선 탐색법(least-cost-first search strategy)을 사용하였다는 점이다. 주어진 상태에서 적합한 공정이 하나 이상 존재할 때 항상 비용이 최소인 공정을 선택하게 된다. 약 55개의 프레임 구조의 지식 베이스로 구성되며, 이러한 지식 베이스는 정해진 양식의 데이터 화일을 미리 작성해 두고 시스템에서 읽어들이 사용할 수도 있고 대화식으로 구축해 갈 수도 있다.

3) QTC(quick turnaround system)⁽⁶⁾

QTC는 창생적 방식의 공정계획 시스템으로 형상특징에 의한 설계, 공정계획, NC 코드 생성 등의 셀 컨트롤(cell control), 공구 검사 등의 vision inspection을 행할 수 있다. 직육면체의 원재(raw material)에 형상특징에 의한 설계를 행한 후 원재와의 불리한 연산을 통해 형상특징을 추출한다(feature refinement). 추출된 형상특징은 형상, 상호관계, 공구 접근 방향 등의 정보를 갖는다. 추출된 형상특징에 대해 공정과 공구를

표 1 기존의 CAPP Systems^(1-3,6)

시스템	부품형상	접근방법	특 징	개발연도	개발자
APPAS	Milling Drilling	창생적방법	Surface modelling Decision tree First generative system	1977	Purdue U. (Wysk)
AUTAP	Rotational Sheet	창생적방법	Interfaced with CAD	1980	Aachen U. (Eversheim, et al.)
CAPP	All	변환적방법	First CAPP System	1976	CAM-I (Link)
EXCAP	Rotational	창생적방법	Fuzzy Rule Backward Chaining	1984	UMIST (Davis & Darbyshire)
GARI	Holes only	창생적방법	First AI based system	1981	Grenoble U. (Descotte & Latcombe)
GENPLAN	All	준창생적방법	GT based coding scheme	1981	Lockheed-Georgia (Tulkoff)
KAPPS	Rotational Prismatic	창생적방법	Know-how based expert system	1986	Kobe U. (Iwata & Fukuda)
MIPLAN	Rotational Prismatic	변환적방법	MICLASS coding system	1976	OIR & GE Co. (Houtzeel)
PART	Prismatic	창생적방법	Integrated system	1988	Twente U. of Tech. (Van Houten & Van't Erve)
PROPLAN	Rotational	창생적방법	Integrating with CAD system	1984	Penn. State U. (Phillips, et al.)
QTC	Prismatic	창생적방법	Integrated system	1988	Purdue U. (Chang, et al.)
SIPP	All	창생적방법	Frame based system	1985	Maryland U. (Nau & Chang)
TOM	Rotational	창생적방법	Backtrack search	1982	U. of Tokyo (Matsushima, et al.)
TURBO-CAPP	Rotational	창생적방법	Knowledge based Interface with CAD	1987	Penn. State U. (Wang & Wysk)
XCUT	Prismatic	창생적방법	Object-oriented programming techniques	1986	Allied corporation (Hummel & Brooks)
XPLANE	Prismatic	창생적방법	Integrated system	1986	Twente U. of Tech. (Van't Erve & Kals)

표 2 공정순서(operation sequencing) 결정에 관한 연구

연구자	최소목적값	접근방법	주요 고려 인자	비 고
Iwata, and Sugimura(8) (1985)	Number of machine tools	Branch and bound method	①Machinability on the specific machine tools ②Precedences ③Tool approach direction	• Machine tools sequenced by ① and ② • Machining sequenced by ③
Van't Erve, and Kals(9) (1987)	Tool changeover and tool travelling time	Heuristic approach	• Tool changeover • Tool travelling time	Sequencing operations within same setup
Roy(10) (1989)	Machining, non-machining time and overall cost	Heuristic approach	• Machinability on the specific machine tools • Precedences	Most economic sequence is selected from fesible solutions
Egbelu, and Lehtihet(11) (1990)	Processing and setup cost with lot size	Dynamic programming	• Processing cost • Setup cost • Lot size	• Formulation by travelling salesman problem • Assume one operation for each machine
Chiang, and Yang(12) (1991)	Transition and direct processing cost	Tabulated optimization scheme	• Tool changeover • Tool travelling time • Priority and direct cost	Sequencing operations within same setup
Rho, Geelink, van't Erve, and Kals(13) (1992)	Tool changeover and tool travelling time	Manipulation with P&T matrices	• Tool changeover • Tool travelling time • Precedences	Sequencing operations within same setup
Lin, and Wang(14) (1993)	Tool changeover and tooling cost	Integer programming	• Tool changeover • Precedence between elementary volumes	Sequencing operations within same setup

선정한다. 공정 선정에는 규칙이 적용되며, 역방향계획(backward planning)이 적용된다. 공구 재질, 수명, 공정명, 치수 등에 따라 공구가 선정된다. 공구비가 최소, 공구수명이 오래 남은 것, 많이 사용한 공구로 공구선정이 이루어진다. 최소 셋업의 수, 최소 공구 교환 횟수로써 최적화 기법에 의해 공

정 순서를 결정한다.

생산 공정을 최적화하기 위해 다음의 두 가지 기법을 사용하였다.

merging : 단순한 몇 개의 형상을 결합시켜 복잡한 형상을 만드는 것.

spliting : 새로운 몇 개의 형상으로 분리 이외에 고정구 선택 (fixturing)과 NC code

표 3 셋업 그룹핑(set-up grouping) 및 셋업간 순서 결정에 관한 연구

연구자	목적	접근방법	주요고려인자	비고
Boerma, and Kals(15) (1988)	Minimize critical tolerances and setup numbers	Heuristic	<ul style="list-style-type: none"> • Feature orientations • Tolerance Relations 	Feature clustering
Chang(6) (1990)	Minimize tool changeover and setup numbers	Heuristic	<ul style="list-style-type: none"> • Tool approach direction • Precedence 	Feature clustering
Nee, Kumar and Puah(16) (1992)	Generate feasible setup for fixturing	Object-oriented expert system	<ul style="list-style-type: none"> • Machining directions • Tolerance Relations 	Feature classification for each machining orientations (setups)
Delbressine, Groot and Vandder Wolf(17) (1993)	Generate feasible setups from FBD representation	Heuristic approach	<ul style="list-style-type: none"> • Precedences • Tolerance Relations • Tool volumes 	Operation sequence rescheduled within the setup

를 만들 수 있다.

4) PART⁽⁷⁾

PART 시스템은 모듈로 구성되어 있으며, 각 모듈은 독립적인 기능을 수행하며 데이터 베이스를 통해 모듈간 정보를 교환한다. 대부분의 시스템이 순서가 고정된데 비해, 각 모듈은 병렬적으로 수행된다. 각 모듈에는 많은 세부 작업이 존재하므로, 한 모듈이 수행된 다음 다른 모듈이 수행되는 것은 처음부터 가능한 대체안을 제거한다. 또한 가능한 모든 대체안을 모두 고려하면 너무 많은 경우의 수가 발생하므로 병렬적인 방법을 취하였다. 각 모듈은 개개의 실행 프로그램인 phase의 구성 요소가 되며, 이러한 phase의 실행 순서는 scenario의 변경으로 구성할 수 있다. 이는 회사마다 적용을 다르게(customizing)하기 위해서이다.

형상특징은 3D CAD에 의한 부품 모델과 blank geometry에 의해 추출한다. 그리고 인식된 형상특징간에 공차관계 등을 기술할 수 있다. 가공공정 선정과 공구 선정에 인공지능 기법을 이용하였으나 전문가 시스템 셸이나 인공지능용 언어를 사용하지 않

았다. 대부분의 시스템이 단순 형상특징(atomic feature)에 대해 공정을 선정하고 형상특징간 관계를 바탕으로 공정 순서를 결정하는데 비해, PART는 복합형상특징(compound feature)에 대해 공정과 공구를 선정하였다.

최소 셋업과 공구수를 목적 함수로 하는 최적화 기법을 도입하였으며, 단순한 몇몇 전문가와 대화에 의한 지식으로 문제를 해결하려 하지 않고, 이론적으로 결정적(deterministic), 절차적(procedural) 방법으로 문제를 해결하려 하였다. 그리고 상호 연관적인 문제와 대체안 처리를 모듈간 병렬적 수행으로 해결하였다. 또한 결과를 항상 사용자에게 제시하여 확인하며, 수정을 행할 수 있게 하였다.

3. 자동 공정계획 전문가 시스템

3.1 전문가 시스템 개요

인공지능 분야의 연구는 1950년대 말 McCarthy에 의해 시작된 이후 1970년대 중

반에 이르러 MYCIN과 같은 전문가 시스템들의 출현에 의해 그 가치를 인정받게 되었다. 이러한 AI기법이 응용된 시스템을 지식 기반 시스템(KBS: knowledge-based system) 또는 지식 기반 전문가 시스템(KBES: knowledge-based expert system) 또는 단순히 전문가 시스템(expert system)이라고 한다.

전문가 시스템은 특정 영역의 문제를 이해할 수 있고 전문 분야의 지식을 지적으로 사용하여 문제 해결의 대안을 제시해줄 수 있는 도구라 정의된다. KBES는 일반적으로 지식 베이스, 인식/추론 기구, 외부 수행 프로그램과의 인터페이스 기구 및 사용자 인터페이스 기구 등의 요소로 구성된다. 지식공학자(knowledge engineer)는 영역 전문가

(domain expert)의 지식과 경험을 바탕으로 하여 전문가 시스템을 구성한다. 공정계획 전문가 시스템은 그림 4와 같이 구성된다.

컴퓨터를 이용한 전문가 시스템은 인간 전문가가 가지고 있는 지식을 충실하게 내장하여 문제를 전문가와 같이 해결하게 하는 것이 목표이다. 과거 10년 동안 수많은 인공지능 연구 그룹들이 고도의 전문 지식을 갖춘 전문가 시스템을 구축해 왔다. 이러한 시스템들은 의학적인 진단과 치료법, 화학적인 구조 분석, 지질학적 탐사, 컴퓨터 구조 선택, 컴퓨터의 고장 진단과 같은 문제 해결을 위해 필요한 전문지식을 갖추고 있다. 이들 전문가 시스템들은 각기 다른 분야에 응용되고 있지만, 지식 표현 기법이나 전문지식에 토대를 둔 추론 기법에 점차 범용적인 방법

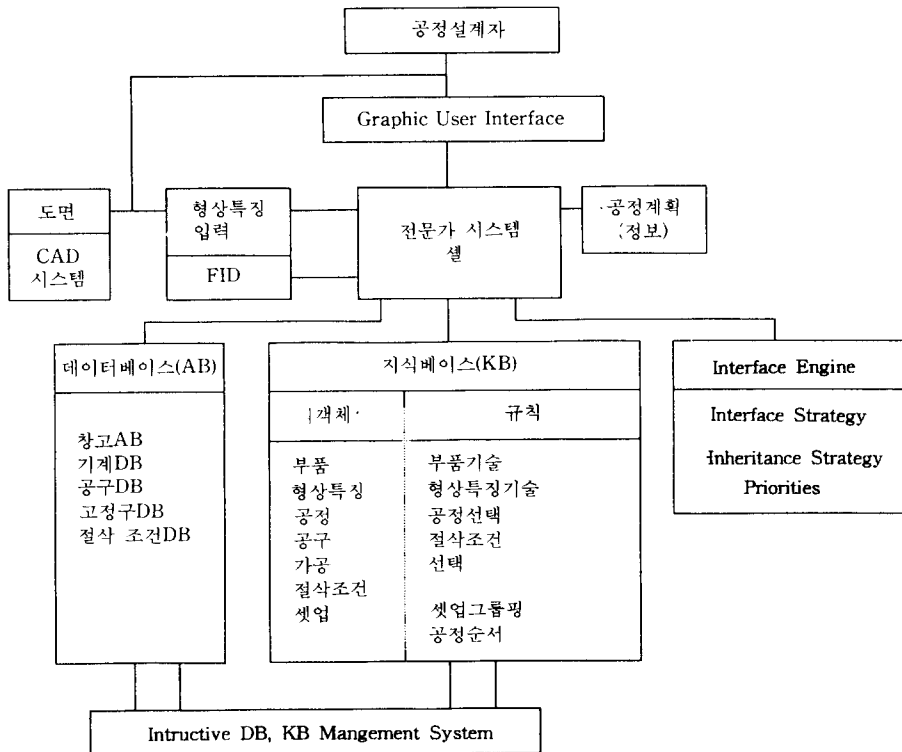


그림 4 공정계획 전문가 시스템

이 도입되고 있음을 알 수 있다.

3.2 개발 과정

3.2.1 전문가 시스템 개발 도구

전문가 시스템을 개발에는 전문가 시스템 셸(expert system shell)을 이용하는 방법과 셸을 이용하지 않는 방법이 있다. 셸을 이용하지 않을 경우에는 인공지능 프로그래밍 언어인 LISP 또는 PROLOG가 주로 사용된다. 셸은 특정한 지식의 표현과 추론을 행할 수 있도록 미리 마련된 소프트웨어로 전문가 시스템 개발을 보다 효과적으로 하기 위한 개발 환경이 제공된다. 규칙 기반, 규칙과 객체를 혼용해서 쓰는 하이브리드, 특정 목적을 위한 셸 등이 있으며, 문제가 가지는 환경과 부합될 경우 개발 시간과 노력을 상당히 감소시킬 수 있다. 공정계획을 위해 사용되고 있는 셸로는 Nexpert-Object, ART-IM, G2, KT, TIRS, KEEE, KAPPA 등이 있다.

3.2.2 전문가 시스템 개발 순서

1) Feasibility Analysis

전문가 시스템을 적용하기 위한 영역(domain)을 결정하고 전문가 시스템을 적용할 수 있는 영역인지 확인하기 위해 다음과 같은 적합성과 가용성을 판단하여야 한다.

- 사람의 문제 해결 지식이 반복되는가?
- 휴리스틱(알고리즘화하기 어렵다. ill-defined heuristic knowledge)이 존재하는가?
- 지식 경험이 잘 변경되지 않는가?
- 경영층, 전문가의 도움이 있는가?

2) Requirements Specification

전문가 시스템을 적용하기에 적합하다고 결론이 나면 제한 조건을 고려하며, 전문가 시스템의 사용자, 목적, 기능, 입출력, 시방(specification), 부가적 기능, 구현 순서(implementation priority) 등을 결정하여야

한다.

3) Preliminary Design

해당 영역에 적합한 지식 표현 방법을 결정하고 지식 표현법에 적합한 추론 방법을 결정하여야 한다. 그리고 전문가 시스템 개발 도구를 결정하고 대상 전문가(domain expert) 등을 결정하여야 한다.

4) Initial Prototype

이전 단계에서 결정된 사항을 확인하기 위해 프로토타입을 만들어 본다. 하나의 부목적을 수행할 수 있도록 깊이 있는 지식을 적용하여 전문가의 지식이 문제 해결에 이용되는지 확인하여야 한다.

5) Detailed Design

이상의 결과를 바탕으로 전체적인 모듈, 지식의 구조화 등 세부 내용을 결정한다.

공정계획은 전문가에 의해 방대한 정보와 지식과 경험을 바탕으로 수행되며, 문제 해결에 전문가에 의한 지식과 경험이 반복되며 주기적으로 변하지 않으며, 알고리즘화하기 어려운 부분이 존재하므로 전문가 시스템을 적용할 수 있다. 설명한 바와 같이 공정계획 전문가 시스템을 구현하기 위해서는 먼저 공정계획 문제의 특성을 파악하여야 하며, 이를 바탕으로 시스템의 사용자, 기능, 입출력 등을 결정한 후 지식의 표현 방법을 정하고 추론 방법을 개발하여야 한다.

3.3 지식 표현 방법

3.3.1 일반적인 표현 방법

지식은 크게 절차적(procedural) 지식과 선언적(declarative) 지식으로 나눌 수 있다. 선언적 지식은 판단할 때 근거로 쓰이는 지식으로 주로 알고 있는 바(know-that)를 나타낸다. 절차적 지식은 주어진 자료를 바탕으로 판단에 이용되는 지식(know-how)이다. 지식의 표현 방법에는 논리(logic), 규칙(rule), 의미 네트워크(semantic network), 프레임(frame), 객체(object)가 있다.

이러한 표현 방법은 규칙과 논리의 규칙기반(rule-based)과 프레임, 객체, 의미 네트워크의 구조(structure)의 두 가지 패러다임(paradigm)으로 나눌 수 있다. 규칙기반 패러다임은 진단, 번역 등 주어진 사실을 바탕으로 추론이 이루어지는 지식의 표현에 적합하다. 즉 절차적 지식을 나타내기 편리하다. 구조적 패러다임은 보다 깊고 관계된 지식을 체계적으로 표현하는데 적합하다. 즉, 선언적 지식을 나타내기에 편리하다.

1) 규칙기반 패러다임(rule-based paradigm)

논리(logic)는 지식 기반 시스템의 중요한 두 가지 개념인 지식 표현과 자동 추론 과정의 형식(formalism)을 제공하며, 진리표(truth table)를 이용하여 복잡한 문장의 참 거짓을 판단하는 boolean algebra를 적용하면서 크게 발전하였다. 간단한 문장의 참 거짓을 판단하여 논리적으로 연결된(and, or로 연결) 전체적인 복잡한 문장을 판단하는 propositional logic과 propositional logic의 지식을 표현하는 약점을 보완한 보다 일반적인 predicate logic이 있다. 추론 방법에는 deduction, induction, abduction이 있다.

규칙(rule)은 IF <premise>, THEN <execution> 형태로 지식을 나타낸다. 전제(premise)가 만족되면 실행(execution)된다. 이는 사람이 지식을 나타내는 방법과 가장 유사하며 탐색 기법(search technique)과 패턴매칭(pattern matching)을 이용하여 추론을 자동화하고 초기 정보(initial data)에서 원하는 결론을 내리는 논리적 과정을 제공한다. 구해진 사실(derived fact)이 더 이상 참이 아니라고 판단되면 변경되는 점(nonmonotonic)과 연역(deduction) 과정에 불확실성이 포함된다는 점에서 논리와 다르다. 휴리스틱(heuristic) 지식을 나타내기에 적합하며 절차적인 지식을 나타내기에 가장 적합하다. 그러므로 대부분의 전문가 시스템이 규칙을 기반으로 하였다. 규칙기반 시스

템은 프로덕션 시스템(production system)으로 불리기도 한다.

2) 구조적 패러다임(structural paradigm)

의미 네트워크(semantic network)은 개념이나 물건을 나타내기 위해 노드(node)와 링크(link)를 이용하여 심볼(symbol)화하여 나타낸 그래프(labeled, directed graph)이다. 노드들은 표현하려고 하는 세계의 대상, 개념, 상태 등을 나타내고, 화살표로 나타내는 링크는 노드들 사이의 관계(relation)를 나타낸다. 각 링크는 각각 의미를 가지고 있어 상호관계를 나타낸다. 각 노드가 직접 연결되어 있어 탐색 시간이 감소되고 그 요소 사이의 관계를 명확히 규명할 수 있다. 그러나 아직 번역의 표준(interpretation standard)이 마련되어 있지 않고, 잘못된 추론이 이루어질 수 있는 여지가 많은 단점이 있어 잘 사용되지 않는다.

프레임(frame)은 지식을 표현하기 위한 구조(structure)와 틀(framework)을 제공한다. 현실 세계의 개념에 대응한 틀을 프레임으로 정의하고 그 개념이 갖는 속성들을 프레임내에 기술한다. 프레임기반 시스템은 pattern-directed방식이라고도 하며, 프레임(frame)은 여러 개의 슬롯(slot)으로 구성되어 있고 각 슬롯에는 여러 가지 성질(값, 종류, range, if-needed, if-changed 등)을 갖는 퍼시트(facet)를 기술할 수 있다. 이러한 슬롯의 퍼시트에 의해 지정된 행동 양식을 취하게 되는데 이러한 절차를 데몬(demon)이라고 한다. 이는 선언적 지식의 구조속에서 절차적 지식을 연계시킬 수 있게 한다. 프레임은 슬롯과 상속성(inheritance)에 의한 계층적 구조(hierarchical structure)로 지식을 체계화할 수 있으며, 주어진 상황에서 값을 결정할 수 없을 때 다른 프레임을 참조하는 등 다음 활동(action)을 지정할 수 있다.

객체(object)는 자신의 자료 구조 외에 고유한 행동 양식을 가진다. 즉, 데이터 구조(data structure)와 메소드(method)를 동시

에 가지고 있다. 상속성에 의해 중복적인 데이터는 상위 객체에 두어 데이터의 중복 없이 구조적으로 표현할 수 있으며, 각 데이터의 조작방법(method)을 기술할 수 있다. 이러한 데이터 구조와 메소드를 캡슐화(encapsulation)하여 하나의 객체가 표현된다. 객체 내부의 처리 과정에 상관없이 필요한 경우에는 객체에 메시지(message)를 보내어 필요한 정보를 구할 수 있다. 객체지향의 특징으로는 추상화(abstraction), 캡슐화(encapsulation) 또는 정보 은닉(information hiding), 상속성(inheritance), 다형성(poly-morphism) 등을 들 수 있다.

처음부터 지식표현 방법으로서 발전해 온 프레임에 비해, 객체지향형은 프로그래밍 기법으로 발전해온 것인데, 결과적으로 비슷한 점이 많다. 특히 메소드를 프레임의 슬롯으로 간주하면 상속 기능을 가진 계층 구조라는 기본적인 범위는 같아진다. 그러나 프레임이 슬롯에 대한 액세스를 수행함에 따라 그 할당 프로시저가 시동되는 일종의 데이터 구동형의 계산 모델인데 비해, 객체지향은 메시지 송신에 의해 메소드가 시동되는 메시지 구동형이라는 점에서 다르다. 프레임과 객체 모두 휴리스틱 지식을 나타내기 어려우며, 만들어진 프로토 타입의 프레임이 존재하지 않으면 실제의 지식을 나타내기 어렵다.

3.3.2 공정계획 지식 표현

공정계획 과정의 각 단계에는 세부 기능이 존재하며, 각 단계별로 유기적인 상호 작용

이 존재한다. 기능은 전문가의 경험과 지식에 의해 절차적으로 이루어지므로 규칙으로 나타내기 편리하며, 각 단계간 다른 단계와의 상호작용, 단계의 정보, 단계의 정보처리 방식을 하나로 묶어 객체로 나타내기 적합하다. 공정계획 과정의 지식을 객체와 규칙으로 나타내면 표 4와 같은 장점이 있다.

그러므로 공정계획의 지식을 표현하기 위해서는 객체와 규칙의 장점을 이용하는 하이브리드 방법이 적합하다. 공정계획의 기능은 규칙으로 표현하며, 기능간 이용되는 정보를 분석하여 객체로 표현한다. 즉, 전문가의 지식과 경험에 의한 공정계획 결정과정은 규칙으로 표현하며, 이용되는 정보는 상속성 등을 이용하여 체계적으로 나타낼 수 있도록 객체로 정의한다. 규칙은 공정계획의 기능에 따라 모듈화되어 있으며, 객체는 데이터와 메소드를 갖는다. 메소드는 데이터 처리 방식과 객체간 상호작용을 표현하며, 데이터 처리 함수와 객체간 상호작용에 의한 규칙과의 연계에 관한 방법을 갖는다. 또한 소속 객체의 생성·변경·삭제에 관한 행동양식을 갖고 있어 객체에 정보변경 등이 발생하면 자동적으로 관계된 다른 객체에 영향을 미친다.

실제정보는 부품의 형상을 나타내는 기하학적 정보, 공차 표면 거칠기와 같은 비기하학적 정보, 그리고 재질 열처리 등의 부품정보로 구성된다. 이러한 실제정보는 다양한 공학적 관점에서 정의되는 기하학적/비기하학적 정보의 집합으로 정의되는 형상특정

표 4 객체와 규칙의 장점

객 체	규 칙
<ul style="list-style-type: none"> ○ 공정계획시 발생하는 정보들의 구조적 표현 ○ 메소드에 의해 정보의 처리방법 기술 ○ 메시지 전달에 의한 <ul style="list-style-type: none"> 정보의 생성·수정·삭제에 의한 상호작용 표현 공정계획 단계의 이동 편리 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 전문가의 지식과 경험의 표현 ○ 모듈화에 의한 규칙의 변경 용이 ○ 인간의 지식 표현에 유사 ○ 데이터 처리와 상호작용 방법 표현 용이

(feature)에 의한 객체로 나타내며, 기하학 상속에 의해 공통된 속성은 상위 객체에 적/비기하학적 속성에 따라 계층적(hierarchy) 구조로 나타낸다. 객체지향의 특징인 두어 데이터의 중복을 피할 수 있으며, 캡슐화(encapsulation)에 의해 데이터와 메소드

표 5 객체에 의한 공정계획 정보와 규칙 표현

정보의 종류	주요 객체	주요 속성	주요 메소드 · 규칙
생산관리 정보	· prod. requirement · cycle time	가공가능시간 효율 생산요구수량 · 기간 cycle time	가공가능시간 계산 cycle time 계산
가공부위 정보	· part	재질, 열처리, 부품관리	부품기술
	· feature	part 이름 size, 방향, 표면거칠기 공차이름	형상특징 기술 부품정보 획득 공차관계 획득
	· tolerance	기준형상특징 공차형상특징 기준 공정 공차 공정	공차관계 기술 공정간 공차정보
공정정보	· process	형상특징명 가공방향 가공시간 공구명, 절삭조건명	공정선정 규칙 가공거리 · 시간 계산 공구정보 획득 절삭조건 정보획득
	· tool	공구경	공구결정
가공조건	· C. C	절삭속도, 피드	절삭조건 결정
관련성 정보	· alternative	기준공정, 대체공정 기준공구, 대체공구	대체안 선정 특수공정, 특수공구
	· precedence	선행형상특징 후행형상특징 선행공정, 후행공정	우선순위 생성
	· MRS	가공기준 형상특징 가공기준 공정	가공기준 선정 공차관계 · 우선순위 변경
생산설비 정보	· machine tool	가공기 종류	가공기 선정
	· jig & fixture	종류	치 · 고정구 선정
	· work cell	가공기 수	생산라인 구성
	· setup	가공기, 치 · 고정구 전체가공시간 공정	공정분배 및 순서결정 비가공시간계산 전체시간 계산 라인 밸런스 확인 라인 밸런스에 의한 변경

를 묶어 하나의 단위 정보로 공정계획에서 이용할 수 있다. 이러한 형상특징 객체는 PART 객체에 의한 부품정보, Tolerance 객체에 의한 공차 정보를 포함한다. 공정계획 단계, 기능, 정보를 표현하기 위한 객체와 규칙을 정리하여 정보의 종류에 따라 나타내면 표 5와 같다. 공정계획 과정에서 실제 생성되지 않지만 우선순위, 공차관계 등 전문가의 주요 고려사항은 객체화하였다.

3.4 추론 방법

규칙 기반 패러다임에서는 추론 방법으로 전방향 추론(forward reasoning)과 역방향 추론(backward reasoning)의 일반적인 추론 방법이 있으나, 구조적 패러다임에서는 일반적인 추론 방법이 존재하지 않고, 따로이 추론 메카니즘을 개발하여야 한다. 프레임에서는 데몬 등을 이용하고, 객체에서는 메소드, 메시지 등을 이용하여 추론을 행하며 프레임, 객체정의시 추론방법을 고려하여야 한다. 두 가지 이상의 지식표현 방법을 이용하는 하이브리드형은 개개의 지식 표현 방법의 특성을 이용하여 추론 메카니즘을 개발하여야 한다. 규칙 기반 패러다임에서 이용되는 전방향 추론(forward reasoning)과 역방향 추론(backward reasoning)은 다음과 같다.

3.4.1 전방향 추론(forward reasoning)

주어진 데이터와 사실(fact)에서 출발하여 결론(conclusion)을 이끌어내는 추론 방법이다. 주어진 데이터나 사실에 의해 추론이 시작된다. 주어진 정보에 따라 전제(premise)가 참인지 확인하고 전제가 모두 만족되면 해당 규칙이 수행된다. 규칙이 수행되면 새로운 사실이 생성되며, 주어진 데이터, 사실에 생성된 사실이 추가된다. 기존의 정보와 생성된 사실을 바탕으로 다시 추론을 행한다. 만족하는 규칙이 다수 존재할 때(conflict reasoning)에는 이 중에서 선택하는

방법이 결정되어 있어야 한다. 결과를 예상하기 어렵고 입력 데이터의 변화에 따른 응답이 필요한 경우에 적합하다. 추론 과정에 사람과의 상호작용이 없으며, 얻어진 데이터를 분석하여 정답을 내는 경우에 알맞다.

3.4.2 역방향 추론(backward reasoning)

결론에서 출발하여 이에 대응하는 근거를 찾는 방향으로 추론을 행한다. 추론의 목적(goal)을 가지고 추론이 시작된다. 주어진 목적을 만족하기 위한 전제를 차례로 확인하여 전제를 만족하기 위한 사실을 찾는 방향으로 추론이 진행된다. 전제의 확인중 새로운 부목적(sub-goal)이 발견되면 이를 확인하기 위한 추론이 시작된다. 이러한 과정이 되풀이하여 최종 목적이 확인되면 추론을 중단한다. 추론과정 중 사실을 발견할 수 없을 때에는 사용자에게 질문을 행한다. 주어진 문제의 결과를 예상할 수 있고 결론의 수가 적고 입력이 많을 때 주로 사용된다. 사용자는 모든 상황에 대해 입력하지 않아도 된다.

3.4.3 하이브리드 추론(hybrid reasoning)

전문가 시스템에 의한 공정계획시 공정설계자는 그래픽 환경을 통해 시스템과 상호작용을 한다. 사용자에게 의해 선택 입력되는 정보와 시스템에 의해 생성된 정보는 객체에 저장된다. 이러한 정보를 이용하여 규칙과 객체의 연계에 의해 추론이 이루어진다. 즉, 사용자에게 의해 입력된 정보에 따라 추론이 행해지기도 하며, 시스템 내부에서 연계적으로 추론이 이루어지기도 한다.

공정계획은 입력의 변화에 따른 즉각적인 대응이나 목적 결과를 알기 위한 문제가 아니며, 주어진 단계에서 기능에 따라 각각의 목적이 존재하므로 규칙의 추론 방법으로는 후방향 추론(backward reasoning)이 적합하다. 후방향 추론 방법에 따라 주어진 단계의 목적(goal)을 달성하기 위해 추론이 시작된다. 추론의 목적은 i)사용자에 의해 윈도우

를 통해 ii)추론의 연계 iii)객체 메소드의 메시지 전달에 정해진다. 추론 과정에서 필요한 사실 정보는 객체를 검색하여 얻는다. 추론 과정중 규칙의 실행에 의해 객체의 생성(동적객체), 정보 저장을 행한다. 규칙은 공정계획시 생성되는 모든 정보를 저장하며, 정보의 생성, 변경, 삭제가 이루어지거나 필

요한 정보가 생기면 메소드에 의해 해당 함수를 수행하거나 규칙에 메시지를 보내어 규칙을 수행한다.

전체적인 공정계획 방법은 다음의 3단계에 의해 수행된다.

- (1) 국부적 공정계획(local process planning):가공부위를 나타내는 형상특징

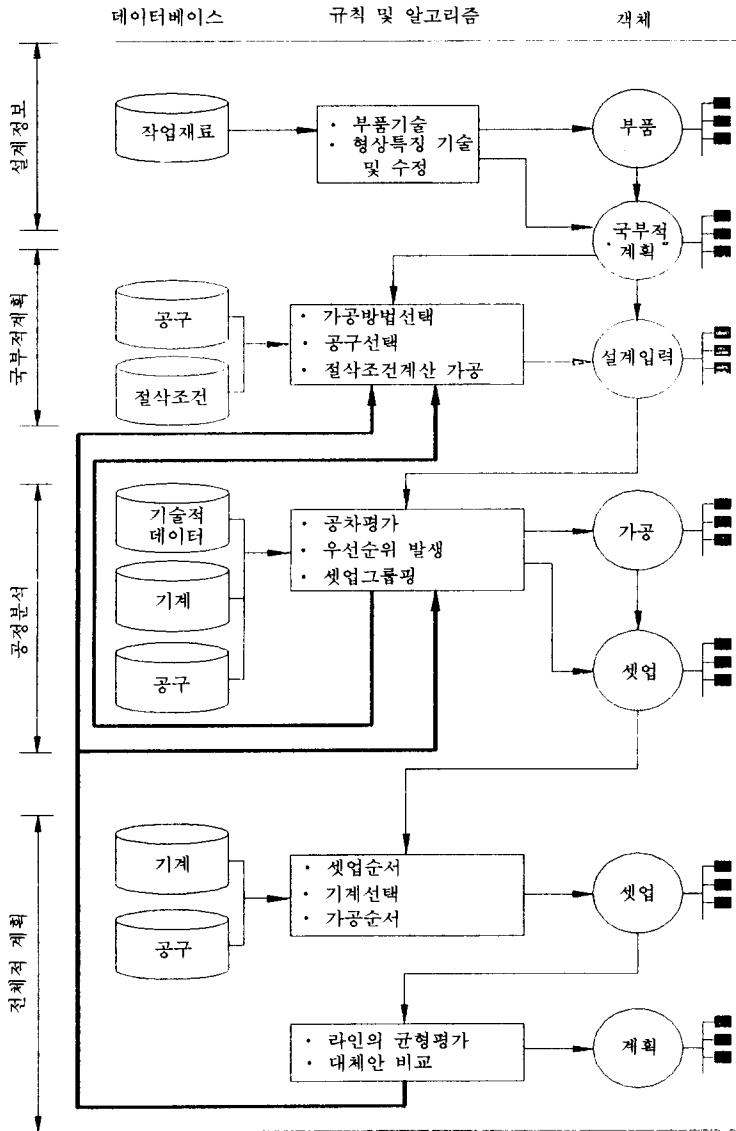


그림 5 공정계획 scheme

(feature)의 입력에 따른 가공공정, 공구선정, 절삭조건이 결정되어 공정 목록의 작성이 이루어진다.

- (2) 공정분석(operation analysis):입력된 형상특징 정보를 바탕으로 공정간 상호관계를 구한다. 이 정보는 다음 전체적 공정계획 과정에서 이용된다.
- (3) 전체적 공정계획(global process planning):공정분석 단계에서 결정된 정보를 바탕으로 국부적 공정계획 단계에서 정해진 공정의 분배 순서결정이 이루어져 공정도상의 제반 정보가 생성된다.

공정분석 단계는 국부적 공정계획과 전체적 공정계획 단계를 연결하여 주기 위한 연결 과정으로 국부적 공정계획 단계의 정보를 바탕으로 전체적 공정계획 부분에서 필요한 정보를 생성하는 부분이다. 또한 최적화 기법 등이 적용될 수 있도록 공정계획 상의 제한 조건들을 생성하는 과정이다. 이는 사용자와 대화적으로 공정계획 과정을 수행하기 위해, 시스템에 의해 생성된 정보를 사용자가 볼 수 있고 수정할 수 있게 하기 위한 것이다. 이상의 3단계에 의한 공정계획 방법과 규칙과 객체에 의한 전체적인 공정계획 scheme은 그림 5와 같다.

4. 맺음말

CAPP는 매우 광범위한 활동과 목적을 포함하는 주제이다. CAPP 연구의 목적은 우선 공정계획의 기능을 분석하여 각 공정계획 기능의 자동화(function automation)를 이룩하고 이러한 기능을 통합(system integration)하는 것이다. 그리고 나아가 수작업에 의한 공정계획 과정이 필요없도록 설계와 생산을 바로 연결시키는 것이다. 형상특징(feature)과 동시공학(concurrent engineering) 등이 이러한 관점에서 이루어지고 있는 연구들이다. 자동화와 통합화를 위해서는 각

종 기술적 데이터와 정보의 표준화가 필요하다. 이러한 데이터의 표준화 없이는 각종 소프트웨어간에 호환성이 있을 수 없으며, 전체적인 통합화는 불가능하다. 그러므로 전체적인 관점에서 각종 정보와 설계와 생산 과정에 관한 정보 표준화가 이루어지고 전체적인 통합화, 자동화가 이루어져야 한다.

참고문헌

- (1) Ham, I. Y., 1988. "Computer-Aided Process Planning: The Present and The Future," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 591~601.
- (2) Kusiak, A., "Intelligent Manufacturing Systems," Prentice Hall.
- (3) Alting, L. and Zhang, H., 1989, "Computer Aided Process Planning: the state-of-the-art Survey," *International Journal of Production Research*, Vol. 27, No. 4, pp. 553~585.
- (4) Descotte, Y. and Latombe, J. C., "GARI: An Expert System for Process Planning," in M. S. Pickett and J. W. Boyse, "Solid Modeling by Computers," Plenum Press, New York.
- (5) Nau, D. S. and Chang, T. C., 1985, "A Knowledge-Based Approach to Generative Process Planning," *Computer-Aided/ Intelligent Process Planning*, the Winter Annual Meeting of ASME, pp. 65~72.
- (6) Chang, T. C., 1990, "Expert Process Planning for Manufacturing," Addison-Wesley Publishing Company.
- (7) Van Houten, F. J. A. M., "Part; A Computer Aided Process Planning System," CIP-Gegevens Koninklijke Bibliotheek, Den Haag, the Netherlands, ISBN 909004127-3.
- (8) Iwata, K. and Sugimura, N., 1985, "An

- Integrated CAD/CAPP System with Know-How on Machining Accuracies of Parts," PED-Vol. 19, *Computer-Aided/ Intelligent Process Planning*, ASME WAM, Miami Beach, Fla., November 17-22, pp. 121~130.
- (9) Van't Erve, A. H. and Kals, H. J. J., 1987, "The Selection of Optimum Machining Operations in Automated Process Planning," 19th CIRP International Seminar on Manufacturing Systems, Penn. State University.
- (10) Roy, U., 1989, "Computer Aided Representation and Analysis of Geometric Tolerances," Ph. D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana, USA.
- (11) Egbelu, P. J. and Lehtihet, A., 1990, "Operation Routing with Lot Sizing Consideration in a Manufacturing System," *International Journal of Production Research*, Vol. 28, No. 3, pp. 503~515.
- (12) Chiang, P. T. and Yang, J. C. S., 1991, "Development of a Process Determination and Sequencing Technique for a Manufacturing System," *International Journal of Production, Research*, Vol. 29, No. 3, pp. 513~535.
- (13) Rho, H. M., Geelink, R., van't Erve, A. H., Kals, H. J. J., 1992, "An Integrated Cutting Tool Selection and Operation Sequencing Method," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, pp. 517~520, January.
- (14) Lin, C. J. and Wang, H. P., 1993, "Optimal Operation Planning and Sequencing: Minimization of Tool Changeovers," *International Journal of Production Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 311~324.
- (15) Boerma, J. R. and Kals, H. J. J., 1988, "FIXES, a System for Automatic Selection of Set-ups and Design of Fixtures," *Annals of the CIRP*, Vol. 37, No.1.
- (16) Nee, A. Y. C., Senthil kumar, A., Prombanpong, S. and Pua, K. Y., "A Feature-Based Classification Scheme for Fixtures," *Annals of the CIRP*, Vol. 41, No. 1, pp. 189~192.
- (17) Delbressine, F. L. M., de Groot, R. and van der Wolf, A. C. H. 1993, "On the Automatic Generation of Set-Ups Given a Feature-Based Design Representation," *Annals of the CIRP*.
- (18) Badiru, A. B. 1992, "Expert Systems Applications in Engineering and Manufacturing," Prentice Hall.
- (19) 人見勝人 著, 曹圭甲 譯, 1986, "生産システム工学," 喜重堂.
- (20) 김현숙, 김소윤 공저, 1994, "지식공학," 크라운출판사.
- (21) Martin, James and Odell, James, 1992, "Object-Oriented Analysis & Design," Prentice Hall.
- (22) Gonzalez, A. J. and Dankel, D. D., 1993, "The Engineering of Knowledge-Based Systems," Prentice Hall. ■