

분산공정계획을 위한 특징형상 기반 추출 공정 및 가공자원 조합

오 익 수*†

* 강릉원주대학교 기계자동차공학부

Combination of Feature-Based Extraction Process and Manufacturing Resource for Distributed Process Planning

Ick Soo Oh*†

* School of Mechanical and Automotive Engineering, Gangneungwonju Nat'l Univ.

(Received May 7, 2012 ; Revised October 11, 2012 ; Accepted October 11, 2012)

Key Words: CAPP(컴퓨터지원공정계획), Distributed Process Planning(분산공정계획), Manufacturing Feature(가공특징형상), Manufacturing Resource(가공자원), Production Planning(생산계획)

초록: 공정계획은 공작물을 원자재 형태의 초기단계로부터 원하는 형상의 마무리 단계까지 경제적이고 완전하게 가공할 수 있는 상세한 방법을 체계적으로 결정하는 것으로 정의되며, 형상으로부터 가공 공정을 추출하여 각 공정을 수행할 수 있는 공작기계 및 공구를 결정하는 과정이 공정계획의 출발점이 된다. 분산공정계획은 형상으로부터 추출된 각 공정에 적합한 가공작업, 공구 등과 같은 다양한 가공자원들을 서로 조합하여, 공작기계의 부하를 고려한 생산계획을 용이하게 수립할 수 있도록 한다. 본 연구에서는 분산공정계획 시스템을 위하여 가공자원 데이터베이스를 구축하고, 가공특징형상을 기반으로 한 작업공정 추출과 각 공정에 유용한 가공자원들을 조합하여 최적의 가공자원을 추출하기 위한 알고리즘을 제안하고 구현하였다.

Abstract: Process planning can be defined as determining detailed methods by which parts can be manufactured from the initial to the finished stage. Process planning starts with determining the manufacturing process based on the geometric shape of the part and the machines and tools required for performing this process. Distributed process planning enables production planning to be performed easily by combining the extracted process and various manufacturing resources such as operations and tools. This study proposes an algorithm to determine the process for a feature-based model and to combine manufacturing resources for the process and implements a distributed process planning system.

1. 서론

컴퓨터지원공정계획(CAPP)은 원자재를 설계된 형상으로 성형하기 위하여 설계정보 분석, 공정선택, 공구선택, 작업순서 결정, 가공조건 결정 등의 의사결정 과정을 컴퓨터를 이용하여 자동화한 공정계획으로 정의할 수 있다. CAPP는 독립적인 자동화 공정계획 시스템으로 개발되기 시작하였으나, 동시공학(CE)을 추구하는 현대산업의 변화에 따라 컴퓨터지원설계(CAD)와 컴퓨터지원생산(CAM)을 연결하여 컴퓨터통합생산(CIM) 시스템을 구축하는데 중심적인 역할을 하므로 CAD

와 CAPP, CAM과 CAPP의 통합에 중점을 둔 CAPP 시스템 개발에 대한 많은 연구가 수행되고 있다. 그동안 CAPP 개발의 주요 과제이었던 NC 공구경로의 자동 생성에 초점을 맞춘 CAPP 시스템은 생산현장의 가공자원 상태를 반영하지 못함으로써 해당 공작기계의 고장이 발생하거나 특정 공작기계에 작업이 집중되어 병목현상이 발생하는 경우를 방지할 수 없다.

분산공정계획(DPP: distributed process planning)은 공정계획을 수립하는 동안 생산현장의 유용한 가공자원 상태를 반영함으로써 생산현장과 동기화된 공정계획을 생성하고, 공정계획의 유연성을 확보하여 피드백에 필요한 시간과 비용을 줄이기 위한 접근방법으로, CAD-CAPP-CAM이 통합된

† Corresponding Author, isoh@gwnu.ac.kr

© 2013 The Korean Society of Mechanical Engineers

CIM을 구축할 수 있는 유용한 방법이다.⁽¹⁻³⁾

Lihui Wang 등⁽⁴⁾은 공정 및 순서를 추출하는 관리 공정계획 영역과 공구경로 및 절삭조건과 같이 특정 가공자원에 한정된 작업계획 영역으로 나누어 특정 공작기계에 한정된 작업계획은 공작기계 컨트롤러나 전용 PC에서 수립하는 에이전트 기반 동적 분산공정계획을 제안하였다. 그러나 공작기계의 일정이나 부하 정보를 고려하지 않음으로써 특정 공작기계에 작업부하가 집중될 경우 대처할 수 있는 유연성이 떨어지며, 설계단계부터 가공특징형을 이용하는 가공특징형상 기반 설계 시스템을 이용한다는 문제점이 있다.

L. Monostori 등⁽⁵⁾은 유전자 알고리즘을 적용하여 생산현장의 변화와 예측하지 못한 상황을 관리할 수 있는 동적 일정계획 시스템을 개발하였으며, L. Li 등⁽⁶⁾은 다양한 가공자원을 보유한 생산현장이 지리적으로 떨어져 있는 분산 환경에 유전자 알고리즘을 적용하여 최적의 공장과 가공자원을 결정하였다. 이는 생산현장의 가공자원 상태에 따른 일정계획을 공정계획에 통합시켜 공정계획의 유연성을 크게 증가시킬 수 있다. 그러나 성형에 필요한 공정추출과 공구선택 과정 없이 최적의 공작기계와 공구가 선택되었다고 가정 한 후, 각 공작기계와 공구에 비용을 부여하고 비용을 인자로 한 최적화 과정을 수행하였다.

본 연구는 Lihui Wang 등⁽⁴⁾이 제안한 분산공정계획 구조에서 특징형상과 가공자원 데이터베이스를 이용한 가공자원 조합 기법을 개발하기 위하여 수행되었다. 초기 공정계획 영역에서 특징형을 이용하여 특정 공작기계에 한정되지 않는 일반 공정을 추출한 후, 추출한 공정 데이터를 이용하여 특정 기계에 적용시킬 수 있는 공구와 작업순서를 결정한다. 또한 부품의 특징형상 정보를 얻기 위하여 설계특징형상 기반 형상모델러와 생산현장의 가공자원 상태를 반영할 수 있는 가공자원 데이터베이스를 구축하여 이용한다.

본 논문은 먼저 설계특징형상으로부터 가공특징형상으로의 매핑과 특징형을 이용한 공정추출에 대하여 기술한 후, 공작기계와 공구의 조합에 의한 작업순서 결정에 대하여 기술한다.

2. 분산공정계획

2.1 시스템 구조

공정추출 기법 및 알고리즘의 유효성을 확인할

수 있는 최소한의 범위로 설계형상을 한정하여 시스템을 설계하고 구현하였다. 부품을 구성하는 모든 특징형상은 단면형상으로 이루어지며, 머시닝센터, CNC 밀링머신, 드릴링 머신으로 가공할 수 있다고 가정한다. 또한 공정계획의 수준은 특징형상에 따른 공정을 추출하고, 각 공정에 대한 공구선택 및 작업순서를 결정하는 수준으로 적용 범위를 정하여 수행한다.

제품에 대한 추론을 용이하게 할 수 있는 지식과 특성을 엔지니어에게 연상시키는 특징형상은 기하학적 정보뿐만 아니라 설계형상이나 가공물의 특징을 내포하고 있어 가공 규칙을 적용하고 가공성 등을 추론하는 데 용이하므로 CIM 시스템에서의 정보전달 매체로 적합하다. 따라서 설계특징형상으로 부품을 모델링한 후, 공정계획에서 특징형상 정보를 이용하는 특징형상기반 설계 개념으로 공정계획 시스템을 구현한다.

특징형상 기반 모델러와 분산공정계획 시스템의 흐름을 Fig. 1에 나타내었다.

1) 설계특징형상 기반 형상모델러

Pocket, slot, step, T-Slot, arch, hole 등의 설계특징형을 특징형상 데이터베이스에 정의하고, 정의된 특징형을 이용하여 부품의 형상을 모델링

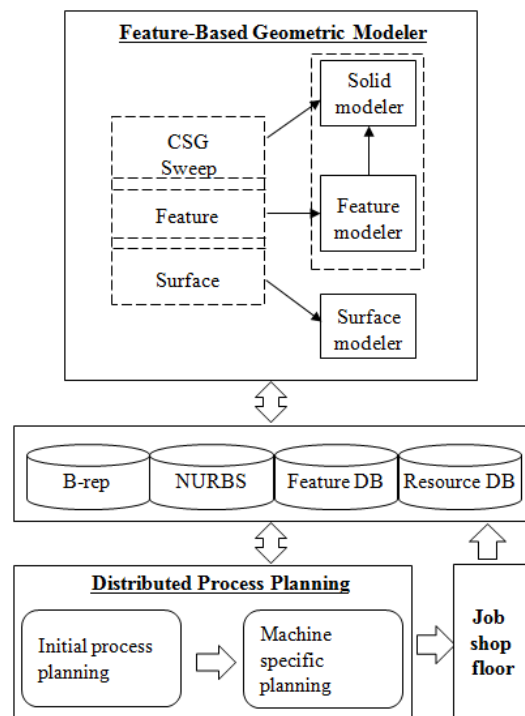


Fig. 1 Architecture of the DPP System

한다. 부품은 설계특징형상 요소들로 구성되며, 설계특징형상 ID, 특징형상 사이의 종속관계, 특징형상의 기하학적 정보 등을 갖는다.

2) 데이터베이스

특징형상 데이터베이스, 가공자원 데이터베이스를 객체지향기법을 이용하여 구축한다. 특징형상 데이터베이스는 CAD 모델러와 공정계획 시스템에서 접근하여 정보를 참조할 수 있으며, 가공자원 데이터베이스는 공정계획시스템에서 참조와 수정을 모두 수행할 수 있다.

3) 분산공정계획

부품 모델 데이터에 포함된 설계특징형상 정보를 분석하고 그에 대응하는 가공특징형상으로 매핑하는 특징형상 파서(parser)를 비롯하여 특정 공작기계에 한정되지 않은 공정추출이 수행되는 초기 공정계획과 특정 공작기계에 관련된 계획을 생성하는 상세 공정계획으로 나누어 수행한다.

2.2 초기 공정계획

특정 공작기계에 한정되지 않은 공정계획 영역인 초기 공정계획에서는 가공특징형상에 따른 공정을 추출한다.

가공특징형상은 특징형상 모델러로부터 생성된 부품 모델의 설계특징형상을 매핑하여 만들어지므로 설계특징형상 모델러의 표현구조를 먼저 기술하기로 한다.

2.2.1 설계특징형상

설계특징형상으로 모델링된 부품은 기하학적 형상정보와 더불어 특징형상들 사이의 종속관계 정보를 그래프 형태로 생성하고 유지한다. 특징형상으로 정의한 부품 모델의 표현구조를 Fig. 2에 나타내었다.

1) 특징형상 종속관계의 표현

절삭가공에 의해 생성할 수 있는 특징형상으로 범위를 한정하였으므로 특징형상의 개구부가 되는 평면은 기초 특징형상이나 먼저 생성된 특징형상의 평면을 참조하여 배치된다. 또한 특징형상의 위치는 치수에 의해 기하요소를 자동으로 변환하는 DDG(dimension driven geometry)메커니즘을 사용하여 다른 특징형상에 속한 기하요소와의 기하학적 관계로 정의한다. 특징형상 배치에

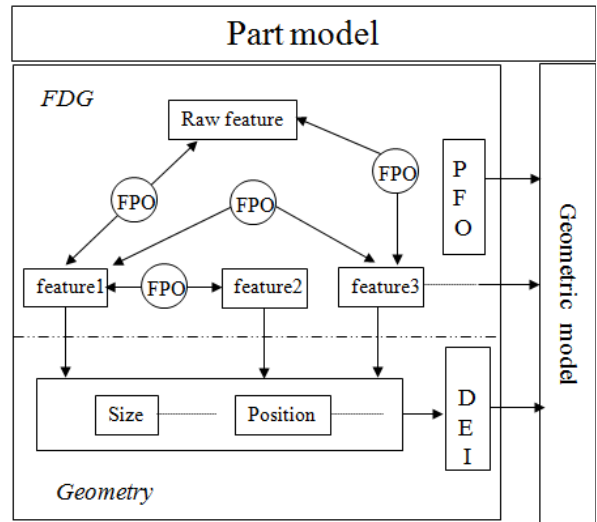


Fig. 2 Representation scheme of a part and feature dependency graph

참조된 기존 특징형상과 새로운 특징형상의 부모-자식 종속관계는 FDG(feature dependence graph)로 표현되며, 원자재에 해당하는 기초특징형상(raw feature) 노드를 루트로 한다. FDG의 각 노드는 FPO 연결자에 의해 연결되고 유지된다.

새로운 특징형상이 추가될 때마다 Boolean operation을 통하여 부품의 기하학적 형상모델이 경계표현법(B-rep)으로 갱신된다. 또한 실행취소나 연산부하를 줄이기 위하여 각 특징형상의 B-rep 형상모델을 복사하여 PFO 연결자로 연결하여 이용한다.

2) 기하학적 정보의 표현

기하학적 정보는 입력 매개변수에 의한 명시적 정보와 특징형상의 특성에 따라 특징형상을 구성하는 기하학적 요소 사이의 관계에 의한 함축적 정보로 구성된다. 특징형상의 위치 및 크기는 위치정의에 사용된 두 개의 기하요소를 연결하는 DEI 연결자에 의해 B-rep 형상모델에 연결되어 유지된다. 특징형상 정의 시 입력 매개변수에 의해 생성되는 치수 및 위치에 대한 명시적 기하정보를 유지하면서 FDG와 B-rep 형상모델을 연결하는 DEI의 표현구조를 Fig. 3에 나타내었다.

특징형상은 모두 평면들로 이루어지므로 각 특징형상의 크기는 특징형상에 속한 면과 면 사이의 거리로 정의될 수 있으며, 크기정보를 갖는 크기정보노드 SZ는 특징형상 생성 시 사용자에게 의하여 입력되는 입력변수의 개수만큼 생성된다.

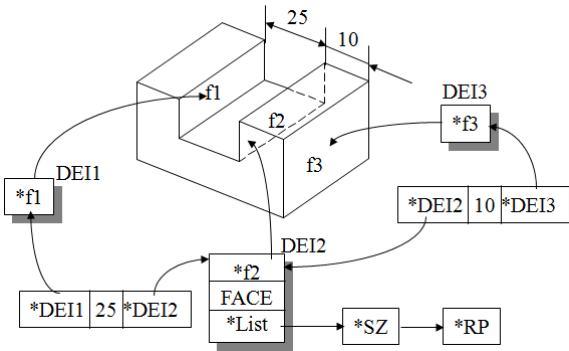


Fig. 3 Geometric entities and its geometric information linked with DEI

따라서 SZ에 가공정밀도 정보를 추가적으로 부여하여 공정계획에서 이용할 수 있도록 한다. 부모특징형상 기하요소와의 상대적인 위치에 대한 명시적 위치정보는 RP 노드에 기록된다.

2.2.2 가공특징형상 생성

가공특징형상은 임의의 공작기계에서 수행되는 작업과 일대일 대응되어야 하지만 설계특징형상은 한 공정으로는 가공이 불가능하거나 설계단계에서 지정된 정밀도나 가공면 상태를 만족시키기 위하여 여러 공정으로 나누어 가공하여야 하는 경우가 있다. 또한 설계특징형상은 그것을 성형할 수 있는 공정에 대한 정보를 가지고 있지 않으므로 설계특징형상으로부터는 공정을 추출할 수 없다. 따라서 모든 설계특징형상을 단일공정에 일대일 대응하는 가공특징형상으로 매핑하여 공정추출에 이용한다.

가공특징형상은 그 형상을 가공 가능한 모든 공정과 공구에 대한 정보를 추가하여 가공특징형상 데이터베이스에 정의하였다.

Fig. 4는 가공작업과 일대일 대응되는 설계특징형상을 가공특징형상으로 매핑할 때의 설계특징형상과 가공특징형상의 구조를 보여준다. slot과 같이 한 개의 가공작업에 일대일 대응되는 설계특징형상은 한 개의 가공특징형상으로 매핑된다.

가공특징형상은 설계특징형상과 연결 상태를 유지하여 별개의 B-rep 형상모델을 생성하지 않고 형상정보를 이용할 수 있다. 또한 유용한 공정과 공구 리스트를 참조하여 가공자원 데이터베이스로부터 적합한 공정, 공작기계 및 공구를 선택하기 위한 멤버함수들이 정의되어 있다.

가공면의 설계조건이나 형상 특성에 기인하여

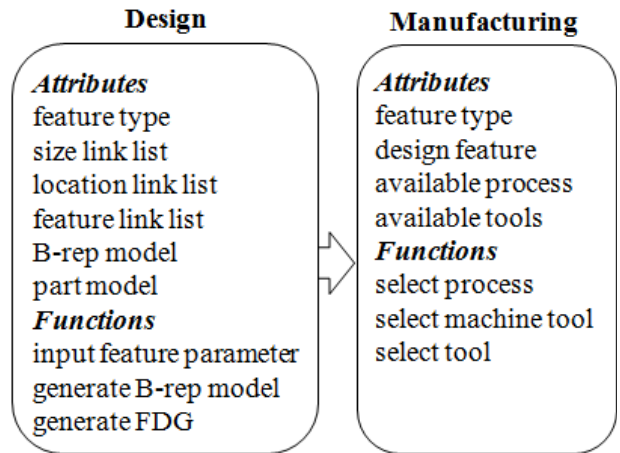


Fig. 4 Feature mapping in the case of a one-to-one correspondence to machining operation

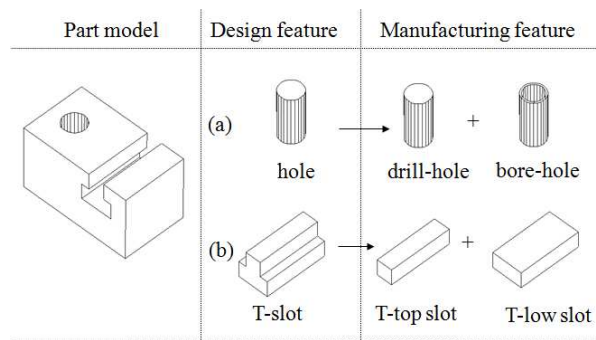


Fig. 5 Feature mapping in the case of hole and T-slot

한 개의 가공특징형상으로 매핑할 수 없는 경우의 예로써 hole과 T-slot의 매핑을 Fig. 5에 나타내었다.

1) hole

드릴링이나 밀링 작업에 대응하는 drill-hole 가공특징형상으로 매핑하고 보링 작업에 대응하는 bore-hole을 drill-hole의 자식 특징형상으로 추가한다. bore-hole의 가공 여부는 공정추출 과정에서 SZ 노드에 있는 가공면의 가공조건에 따라 결정한다.

2) T-slot

가공물의 내측으로 확장되는 특징형상이므로 T-slot 커터가 진입할 수 있도록 상부의 T-top slot으로 매핑하고 하부의 형상에 대응하는 T-low slot특징형상을 생성하여 T-top slot의 자식특징형상으로 추가한다.

특징형상 매핑은 설계특징형상 FDG의 특징형상 노드를 백트래킹 기법으로 탐색하면서 hole이나 T-slot이 있으면 그에 대응하는 가공특징형상으로 매핑하고, 새로운 특징형상 노드를 생성하여 추가한다. 위에서 기술한 매핑 과정을 Fig. 6에 나타내었다.

2.2.3 공정추출

부품을 구성하는 모든 설계특징형상에 대하여 매핑하면서 새로운 가공특징형상 종속관계 그래프 MFDG(manufacturing feature dependence graph)를 생성한다. 부품의 가공에 필요한 모든 공정은 MFDG의 특징형상 노드를 탐색하면서 추출한다.

앞서 기술한 바와 같이 대부분의 특징형상은 밀링작업에 적합한 형상이므로 밀링, 드릴링, 보링을 모두 적용할 수 있는 hole의 공정추출에 대하여 기술하기로 한다.

hole은 깊이와 가공면의 정밀도에 따라 center cut이 가능한 엔드 밀링 혹은 드릴링 공정에 의하여 가공될 수 있으므로 특징형상 매핑 과정에서 hole 설계특징형상은 drill-hole과 bore-hole 가공특징형상으로 매핑된다. drill-hole은 엔드 밀링과 드릴링 공정정보에 모두 연결된다.

본 연구에서는 drill-hole의 바닥면 형상을 공정선택 기준으로 하여 바닥면이 평면으로 막힌 hole은 밀링공정이 추출되도록 하였으며, 이는 생산현장에서 일반적으로 사용하고 있는 기준이다.

```

Begin
  i = 1
  repeat
    if i less than (number of features + 1)
      visit ith node of FDG
      if (feature type is T-slot)
        replace T-slot with T-top-slot
        add T-low-slot as child of T-top-slot
      else if (feature type is through-hole)
        replace hole with drill-hole
        refer surface finish condition
        if (need boring)
          add bore-hole as a child of hole
      else
        replace design feature with
        corresponding feature
    i++
  End
    
```

Fig. 6 Pseudo code of feature mapping algorithm

2.3 분산공정계획

분산공정계획은 생산일정에 따르는 가공자원의 가용성에 대한 정보를 기초로 하여 공정계획을 수립한다. 이를 위하여 한 부품을 기계가공하기 위하여 요구되는 모든 자원을 결정한 후, 보유하고 있는 가공자원 중 가용자원을 가공자원 데이터베이스에서 찾아 공정모델을 만든다.

2.3.1 가공자원 데이터베이스

생산현장에서 활용할 수 있는 가공자원 데이터베이스의 데이터는 다양하고 방대하지만 본 연구에서는 밀링공정과 드릴링공정에 이용할 수 있는 공작기계와 각 공작기계에서 사용하는 공구 데이터에 한정하였다. 본 연구의 분산공정계획 구조에서의 작업 흐름과 가공자원 데이터베이스의 역할을 Fig. 7에 나타내었다.

하나의 공정에 적용할 수 있는 공작기계와 공구의 조합은 매우 다양하므로 가공자원의 일부 특성들은 다른 가공자원과의 관계에 의하여 수시로 추가되어야 한다. 이러한 특성을 만족시키기 위하여 각 가공자원의 특성을 자원의 고유한 특성에 해당하는 고정정보와 다른 가공자원과의 관계나 생산계획에 의한 사용일정, 고장 등과 같은 유동정보로 분류하여 처리한다.

각 가공자원의 고정 정보는 그 용량이 심각한

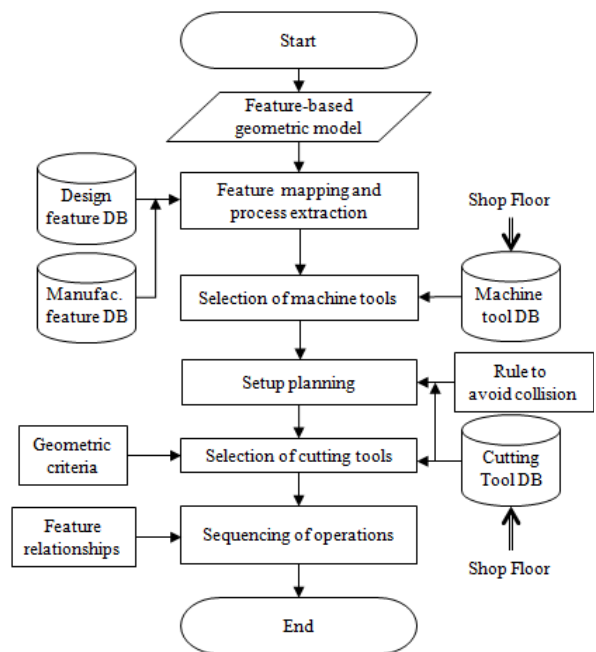


Fig. 7 Process and manufacturing resource database of the DPP in this study

Table 1 Static and floating data of a machine tool and a cutting tool in the manufacturing resource database

	Static data	Floating data
Machine tool	Power, Table travel, Spindle speed, ATC, ATC time, Rapid feed, Spindle taper, Weight, Motor	Broken, Fix, Production schedule
Cutting tool	Diameter, Width, Length, Material, Chuck, Adapter	Tool wear, Stock, Tool life

수준에 이를 만큼 방대하지 않으므로 쉽게 접할 수 있는 DBMS인 MS Access를 이용하여 관계형 데이터베이스로 구축하였으며, 다수의 사용자가 정보를 공유하도록 네트워크를 이용하여 다수의 사용자가 접속할 수 있는 ODBC 인터페이스를 이용하였다. Table 1은 본 연구에서 고정정보와 유동정보로 구성하여 구축한 가공자원 데이터베이스의 레코드를 나타낸다.

공작기계의 데이터 중 주축 회전수, 급속 이송 속도, 모터 등과 같은 특성들은 향후 연구과제인 가공조건의 산출시 공작기계 선택의 주요 정보로 이용될 수 있을 것이다. 또한 주축 테이블은 공구와 관련된 부속품의 선택에 필요한 정보로 이용된다. 공구의 정보 중 공구직경 및 공구길이는 가공하고자 하는 특징형상의 치수와 비교하여 적용 가능성을 결정하기 위한 정보로 이용된다.

2.3.2 공구접근방향 선택 및 셋업

앞서 작성한 공작기계 후보군 목록을 참조하여 각 공작기계에 적합한 공구 후보군 목록을 작성한다. 공구의 실제 사용 가능성은 가공물의 셋업 방향에 따라 달라지므로 가공물 셋업 방향을 먼저 결정한다. 공구교환을 최소화할 수 있는 셋업 방향은 다음과 같은 과정을 통하여 결정한다.

- (1) 공구 접근방향 후보군 추출
- (2) 충돌 검사
- (3) 공구 접근방향 결정

1) 공구 접근방향 후보군 추출

모든 특징형상에 대하여 가능한 모든 공구 접근 방향을 추출하여 목록을 작성한다. 모든 특징형상은 공작물 경계면상에 한 개 이상의 개구부

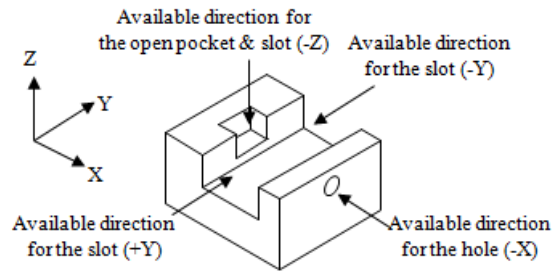


Fig. 8 Available tool approach direction of each feature

가 있으며, B-rep 형상모델의 기하정보를 이용하여 그 면의 법선벡터 방향을 공구의 접근방향 후보군에 추가한다. 개구부를 이루는 면의 기하학적 정보는 2.2.1에서 기술한 특징형상 표현 구조에 의하여 기준평면과 배치평면의 상대거리가 0인 RP 노드를 탐색하여 이용한다.

각 특징형상에 대하여 가능한 공구 접근방향을 모두 추출한 후, 격자 대수학을 이용하여 같은 방향에서 가공될 수 있는 특징형상들의 개별적인 방향을 한 개의 방향으로 통합하여 표현한다.

Fig. 8의 모델에서 through-slot의 가능한 공구 접근방향 집합으로는 {+Y, -Y, -Z} 방향을, open-pocket은 {-Z, -X}, through-hole은 {+X, -X} 방향을 Table 2와 같이 얻을 수 있다.

2) 충돌검사

앞서 작성한 공구 접근방향 후보군 중 공구와 가공물과의 충돌 발생 여부를 검사하여 충돌이 발생할 경우, 후보군에서 삭제한다.

Fig. 9는 hole 가공에 있어서 공구직경(ϕT), 공구길이(TL), 척의 직경(ϕC), hole의 직경(ϕH)에 의한 충돌영역을 표시한다. 충돌검사는 공구가 최종 결정되기 전의 과정이므로 hole의 직경에 맞는 드릴이 있을 경우에는 해당 드릴의 직경과 공구길이를 ϕT 와 TL값으로 적용하고, 해당 드릴이 없을 경우에는 hole직경의 0.5배 이하의 직경을 갖는 엔드밀의 직경과 길이를 적용한다.

공구는 항상 특징형상 개구부 내에서 운동하므로 가공하고자 하는 특징형상의 개구부 윤곽을 공구길이 만큼 스위프(sweep)시킨 공간을 만들어 가공물과의 충돌 여부를 검사한다. 또한 척과 hole의 직경, 공구직경을 인수로 하는 $\phi(C+H-T)$ 의 직경을 갖는 원을 공구접근 반대방향으로 최종 면까지 스위프한 공간을 척에 의한 충돌공간으로 정의하고, 척과 가공물과의 충돌검사를 수행한다.

Table 2 Mutation to determine feasible tool approach direction

	Open -pocket	Through -slot	Through -hole
Before collision test	-Z, -X	+Y, -Y, -Z	+X, -X
After collision test	-Z	+Y, -Y, -Z	-X

Table 3 Available tools for manufacturing features

Feature	Available milling tools
Pocket	Center cutting end mill, Flat end mill
Slot	Flat end mill,
T-slot	Flat end mill & T-slot end mill
Step	Flat end mill Face mill & Flat end mill
Arch	Ball end mill
Hole	Drill, Bore, Reamer, Center cutting end mill

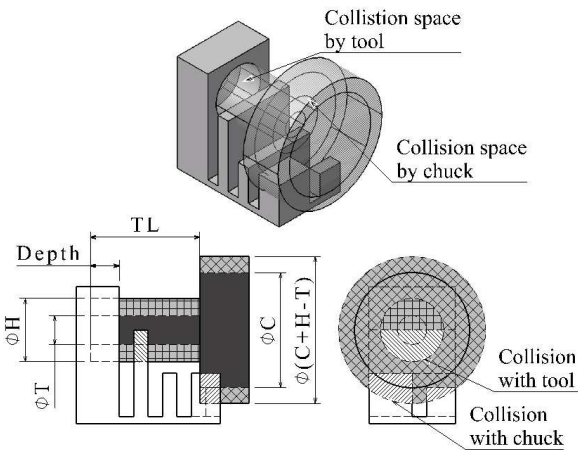


Fig. 9 Collision space calculated by the tool and chuck geometry

3) 공구 접근방향 결정

충돌검사를 거쳐 Table 2와 같이 결정된 공구 접근방향에 대하여 다음과 같이 격자 대수학을 적용시켜 셋업을 최소화할 수 있는 공구 접근방향 {-Z, -X}를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & -Z \wedge (+Y \vee -Y \vee -Z) \wedge -X \\
 & = (-Z \wedge +Y \vee -Z \wedge +Y \vee -Z \wedge -Z) \wedge -X \\
 & = -Z \wedge -X
 \end{aligned}$$

이와 같이 결정된 공구 접근방향에 따라 through-slot과 open-pocket은 -Z방향으로, through-hole은 -X방향으로 가공함으로써 최소의 셋업으로 모든 특징형상을 가공할 수 있다.

2.3.3 공구선택

최적 공구선택은 가공물의 재질, 절삭종류, 절삭깊이, 이송속도, 공작기계의 출력, 가공비용 등을 종합적으로 고려하여야 하지만, 최적 공구선택 기법은 본 연구의 범위를 벗어나므로 공구와 특징형상의 기하학적 관계만을 고려한 일반적 기

준에 따라 선택한 공구를 최적 공구로 가정한다. 공구의 직경은 가공의 안정성과 시간을 단축시키기 위하여 가능한 한 큰 직경의 공구를 사용한다. 본 연구에서는 생산현장의 일반적 기준에 따라 앤드밀링 공구의 길이와 직경 결정 기준을 다음과 같이 마련하여 적용하였다.

- (1) 최대 가공깊이: 공구의 가공깊이는 flute길이+shank길이×0.3을 초과하지 않는다.
- (2) 가공 패스 횟수: 가공시간 단축을 위해 요구 패스 횟수는 1회부터 설정하여 시작한다.
- (3) 1회 절삭깊이: 1회 절삭깊이는 요구 패스 횟수에 의해 결정하며, 공구직경의 0.5배를 초과하지 않는다.

이러한 기준에 따른 앤드밀의 직경 결정과정은 다음과 같다.

- (1) 최대 가공깊이가 특징형상 깊이보다 큰 flute 길이를 갖는 앤드밀을 후보군으로 선정하고, 요구 패스 횟수를 1로 설정한다.
- (2) 주어진 깊이를 가공하는 패스 횟수 설정에 따라 절삭깊이를 산출한다.

(3) 공구의 직경은 앞서의 과정에서 산출한 절삭깊이의 2배로 결정하며, 해당 공구는 특징형상 가공면에 포함되어야 한다. 이를 만족하지 못하면 요구패스를 1회 증가시킨 후 (2)의 과정으로 돌아간다. 공구직경이 가공면에 포함될 경우, (1)의 과정에서 선정된 후보 공구목록에서 공구를 선택한다. 후보군에 해당 공구가 없으면 요구패스를 1회 증가시킨 후, (2)~(3)의 과정을 되풀이한다.

본 연구에서 정의된 특징형상들을 가공하기 위한 공구들로서, 가공자원 데이터베이스의 공구를 Table 3에 나타내었다.

Table 4 Initialization of the feature matrix for the model in Fig. 10

Feature Feature	FT01	FT02	FT03	FT04
FT01	0	0	1	1
FT02	0	0	0	0
FT03	0	1	0	0
FT04	0	0	0	0

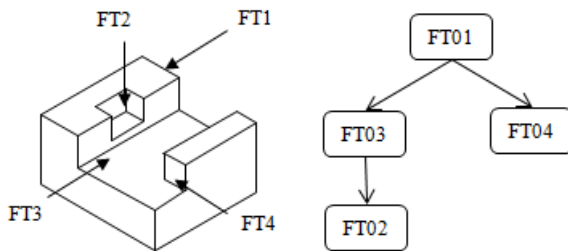


Fig. 10 A feature-based model and its MFDG

2.3.4 작업순서 결정

하나의 셋업에서 가공하여야 할 특징형상들의 가공 순서는 특징형상들 사이의 종속관계에 의하여 결정한다. 자식특징형상은 그 부모특징형상이 가공된 다음에 가공할 수 있으며, 종속관계는 MFDG를 탐색하여 확인한다.

특징형상의 종속관계에 근거한 작업순서는 본 연구에서 제안한 특징형상 행렬 알고리즘을 이용하여 쉽게 결정할 수 있다. Fig. 10과 같이 기초 특징형상(FT1), open-pocket(FT2), through-slot (FT3), through-hole(FT4)로 이루어진 모델의 작업순서를 결정하기 위한 특징형상 행렬 알고리즘의 적용 절차는 다음과 같다.

1) 특징형상 행렬 초기화

특징형상의 타입, 생성순서와 관계없이 하나의 셋업에서 가공할 수 있는 n 개의 특징형상들을 행과 열에 대응시킨 $n \times n$ 정방행렬 M 을 만들고, i 행 특징형상에 대한 j 열 특징형상의 부모-자식 관계 판별 값을 $M(i,j)$ 요소의 값으로 대입한다. i 행 특징형상이 j 열 특징형상에 직접 연결된 부모특징형상일 경우 $M(i,j)$ 요소는 1의 값을 갖는다. Fig. 10의 모델에 대한 특징형상 행렬은 Table 4와 같이 초기화된다.

2) 작업순서 결정

특징형상 행렬에서 요소의 값이 모두 0인 열은

Table 5 Determination of the order of operation by feature matrix for the model in Fig. 10

Feature No Feature	FT01	FT02	FT03	FT04	
1 (FT01)	FT01	0	0	1	1
	FT02	0	0	0	0
	FT03	0	1	0	0
	FT04	0	0	0	0
2 (FT03)	FT01	NULL	NULL	NULL	NULL
	FT02	NULL	0	0	0
	FT03	NULL	1	0	0
	FT04	NULL	0	0	0
3 (FT04)	FT01	NULL	NULL	NULL	NULL
	FT02	NULL	0	NULL	0
	FT03	NULL	NULL	NULL	NULL
	FT04	NULL	0	NULL	0
4 (FT02)	FT01	NULL	NULL	NULL	NULL
	FT02	NULL	0	NULL	NULL
	FT03	NULL	NULL	NULL	NULL
	FT04	NULL	NULL	NULL	NULL

그 열에 해당하는 특징형상의 상위 부모특징형상이 없음을 의미한다. 따라서 요소의 값이 모두 0인 열을 찾아 작업순서 시트에 해당 특징형상을 등록한 후, 행렬에서 그 특징형상에 대응하는 행과 열의 요소 값을 NULL로 치환한다.

모든 열이 NULL로 치환될 때까지 이와 같은 과정을 재귀적으로 반복한다. 이 과정 중 요소 값이 모두 0인 열이 2개 이상 있다면, 작업 우선 순위가 동등하다는 의미이므로 각 열에 해당하는 특징형상을 임의의 순서로 작업순서 시트에 등록하고, 해당 특징형상에 대응하는 행과 열의 요소 값을 NULL로 치환한다.

이상과 같은 특징형상 행렬 알고리즘을 이용하면 Table 5와 같이 FT01, FT03, FT04, FT02의 특징형상 작업이 순차적으로 결정되며, 이는 Fig. 10의 MFDG 종속관계를 만족시키는 작업순서임을 확인할 수 있다.

3. 적용 사례 및 고찰

분산공정계획에서 가공자원 데이터베이스는 중요한 역할을 한다. 특징형상의 범위가 한정된 본 연구에서는 생성할 수 있는 형상이 단순하여 가공자원 데이터베이스로부터 추출한 가공자원의

Model	Group	Travel-X	Travel-Y	Travel-Z	Table-X	Table-Y	RPM	RFeed X	RFe
KV25	0	500	280	380	650	300	6000	30	
KV35	0	600	450	510	920	460	6000	30	
NVN-500	0	1020	510	575	1200	500	8000	24	
PMV-08BS	0	1000	700	460	650	240	30000	30	
OWINNER150	1	650	290	300	1065	230	2720	5	
Secure1	0	1100	510	600	1360	620	10000	30	

RFeed Y	RFeed Z	Taper	Type	Taper No.	ATC	ATC Time	Tools	Load Wt.	Motor
30	38	2		30	<input checked="" type="checkbox"/>		0.9	10	150
30	24	2		40	<input checked="" type="checkbox"/>		1.5	20	300
24	20	4		40	<input checked="" type="checkbox"/>		3	24	800
30	20	2		50	<input checked="" type="checkbox"/>		2	20	1000
5	3	2		40	<input type="checkbox"/>		0	0	800
30	30	2		40	<input checked="" type="checkbox"/>		2	24	800

(a) Machine Tool

nID	Model	Cutter Dia.	Shank Dia.	Cutter Length	Whole Length	Material Dpt.	Material No.
1	SSE2030	3	6	10	45	P	10
2	SSE2040	4	6	12	45	P	10
3	SSE2050	5	6	15	50	P	10
4	SSE2070	7	8	20	60	P	10
5	SSE2100	10	10	25	70	P	10
6	SSE2120	12	12	30	80	P	10

(b) Solid Spiral Flat End Mill

nID	Model	Cutter Dia.	Hole Dia.	L Width	Edges	Material Dpt.	Material No.
1	SMC1	60	22	4	10	P	10
2	SMC2	60	22	6	10	P	10
3	SMC4	60	22	10	10	P	10
4	SMC6	60	22	14	10	P	10
5	SMC8	60	22	18	10	P	10
6	SMC10	60	22	22	10	P	10

(c) Side Milling Cutter

Fig. 11 An example of data record in the machine tool database and cutting tool database



Fig. 12 An example of user interface for the cutting tool database

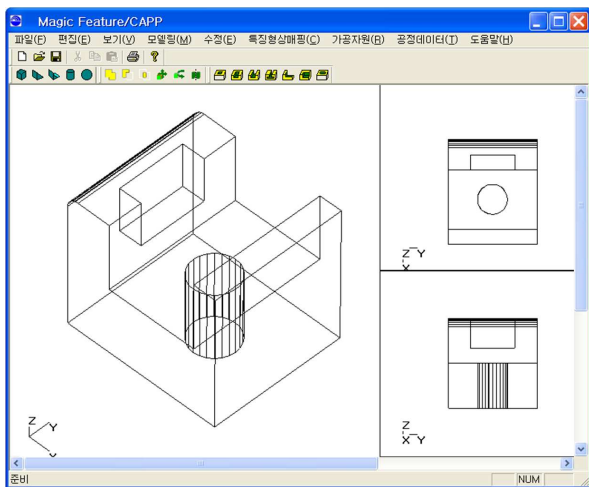


Fig. 13 An example of the part modeled by feature modeller

```

/*Feature Data*/
840 /*Feature name (Arch)*/
0 /*Number of parent feature except raw feature*/
0 /*Null data*/
4 /*Number of tool approach direction*/
0.000000 1.000000 0.000000 /*First tool approach direction*/
60.000000 5.000000 0.000000 /*Parameter (depth, radius, Null data)*/
0.000000 -1.000000 0.000000 /*Second tool approach direction*/
60.000000 5.000000 90.000000 /*Parameter (depth, radius, Null data)*/
    
```

```

760 /*Feature name (Open pocket)*/
1 /*Number of parent feature except raw feature*/
790 /*Parent feature name (Slot)*/
1 /*Number of tool approach direction*/
0.000000 0.000000 -1.000000 /*First approach direction*/
20.000000 30.000000 10.000000 /*Parameter (width, depth, length)*/
    
```

```

/*Process Requirements*/
1 /*Total number of set up*/
0.000000 0.000000 -1.000000 /*First tool approach direction*/
1 /*Number of required set up for the given direction*/
4 /*Number of machinable feature for the given direction*/
KV25 /*Machine Tool*/
790 /*First feature (slot)*/
PES2020R /*IndeXible end mill ≈20*/
SSE4150 /*Solid spiral end mill ≈15*/
760 /*Second feature (open pocket)*/
SSE2040 /*Solid spiral end mill ≈4*/
750 /*Third feature (through hole)*/
SSD090 /*Solid drill ≈9.0*/
MR110 /*Reamer ≈10*/
840 /*Fourth feature (arch)*/
SSBE2060 /*Solid spiral ball end mill ≈3.0*/
    
```

Fig. 14 The process requirements generated by the system

```

/*Process Requirements*/
2 /*Total number of set up*/
0.000000 0.000000 -1.000000 /*First tool approach direction*/
3 /*Number of machinable feature for the given direction*/
KV25 /*Machine Tool*/
790 /*First feature (slot)*/
PES2020R /*IndeXible end mill ≈20*/
SSE4150 /*Solid spiral end mill ≈15*/
760 /*Second feature (open pocket)*/
SSE2040 /*Solid spiral end mill ≈4*/
840 /*Fourth feature (arch)*/
SSBE2060 /*Solid spiral ball end mill ≈3.0*/
0.000000 0.000000 1.000000 /*Second tool approach direction*/
1 /*Number of machinable feature for the given direction*/
KV25 /*Machine Tool*/
750 /*Third feature (through hole)*/
SSD090 /*Solid drill ≈9.0*/
MR110 /*Reamer ≈10*/
    
```

Fig. 15 Change of the process requirements according to the modification of tool database

조합이 비교적 단순하였으나, 공구 데이터베이스의 공구길이, 공구직경 및 척 데이터는 공구선택과 공구 접근방향 선택의 결정인자 역할을 하고 있다. Fig. 11과 Fig. 12는 각각 가공자원 데이터베이스와 인터페이스의 한 예를 나타낸다.

Fig. 13은 특징형상 모델러를 이용하여 slot, open-pocket, through-hole, arch로 이루어진 부품을 모델링한 예를 나타내며, Fig. 14는 Fig. 13의 모델을 구성하는 특징형상 정보를 이용하여 밀링공정에서의 공구 접근방향과 가공순서 및 사용 공작기계, 공구 정보를 생성한 적용 예를 나타낸다.

Fig. 13의 모델을 구성하는 특징형상들은 모두 -Z 방향을 공통적인 공구 접근방향으로 가지고 있다. 따라서 -Z 방향이 공구 접근방향으로 결정되었음을 Fig. 14에서 볼 수 있으며, 주어진 부품은 사용공구를 고려할 때 가공자원 데이터베이스에 저장되어 있는 모든 공작기계로 가공할 수 있으나 이송거리 및 테이블 크기를 기준으로 공작물에 가장 근접한 공작기계가 우선적으로 선정되었다.

Fig. 15는 공구선택 알고리즘의 타당성을 확인하기 위하여 hole 가공을 위한 모든 드릴과 리머의 전체길이를 공구 데이터베이스에서 짧게 수정한 후, 다시 수행한 결과를 나타낸다. 드릴의 길이가 짧아져 slot과의 충돌이 발생하므로 hole의 공구 접근방향이 +Z 방향이 되면서 공작물의 셋업 수가 2로 증가하였음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구는 유연생산 시스템에서 평면으로 이루어진 공작물의 기계가공을 위한 컴퓨터지원공정계획 시스템을 개발하고자 수행되었으며, 연구를 통하여 이룬 성과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

(1) 설계특징형상으로부터 가공특징형상으로의 매핑 메커니즘을 설계하고 구현함으로써 향후의 복잡한 가공조건과 형상을 갖는 특징형상 정의 기법과 데이터베이스 구축의 토대를 마련하였다.

(2) 설계과정에서 특징형상의 경계면에 가공면의 가공조건 정보를 부여할 수 있는 설계특징형상의 표현구조를 적용하여 그 유효성을 확인하였다. 이러한 표현구조를 확장하면 향후의 다양한 가공관련 정보를 포함시킬 수 있을 것으로 기대된다.

(3) MFDG에 근거한 작업순서 결정을 위하여 본 연구에서 제안한 특징형상 행렬 알고리즘의 효율성을 확인할 수 있었다. 또한 공구 행렬과 함께 사용하면 공구교환을 최소화하는 알고리즘으로 발전시킬 수 있을 것으로 기대된다.

4) 특징형상의 범위를 한정함에 따라 실제 현장에서의 응용성과 고급기능 구현에 한계를 가지고 있다. 따라서 다양한 특징형상 정보를 생성할 수 있도록 모델러의 개선이 필요하며, 재질, 비용 등 다양한 인자와 가공지식 데이터베이스를 기반

으로 한 공구자원 선택 알고리즘 개발이 추가적으로 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구는 강릉원주대학교 장기해외파견 연구과제의 일환으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Maropoulos, P. G., 1995, "Review of Research in Tooling Technology, Process Modelling and Process Planning Part I: Tooling and Process Modelling," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 5~12.
- (2) Maropoulos, P. G., 1995, "Review of Research in Tooling Technology, Process Modelling and Process Planning Part II: Process Planning," *Computer Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 8, No. 1, pp. 13~20.
- (3) Zhang, H.-C. and Alting, L., 1994, *Computerized Manufacturing Process Planning Systems*, Chapman&Hall, London, pp. 230~256.
- (4) Wang, L., Feng, H.-Y. and Cai, N., 2003, "Architecture Design of Distributed Process Planning," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 22, No. 2, pp. 99~115.
- (5) Monostori, L., Kadar, B. and Hornyak, J., 1998, "Approaches to Managing Changes and Uncertainties in Manufacturing," *Annals of the CIRP*, Vol. 47, pp. 365~368
- (6) Li, L., Fuh, J.Y.H., Zhang, Y.F., Nee, A.Y.C., 2005, "Application of Genetic Algorithm to Computer-Aided Process Planning in Distributed Manufacturing Environments," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 21, No. 6, pp. 568~578.
- (7) Ma, Y. S. and Tong, T., 2003, "Associative Feature Modeling for Concurrent Engineering Integration," *Computers in Industry*, Vol. 51, No. 1, pp. 51~71.
- (8) Liu, X., 2000, "CFACA: Component Framework for Feature-Based Design and Process Planning," *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No. 7, pp. 395~460.

- (9) Shen, Y. and Shah, J. J., 1998, "Recognition of Machining Features Based on HSPCE Decomposition, and Process Centered Classification," *Trans. of the ASME*, Vol. 120, pp. 668~678.
- (10) Kumar, V., Burns, D., Dutta, D. and Hoffmann, C., 1999, "A Framework for Object Modeling," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, No. 9, pp.541~556.
- (11) Gu, P., 1994, "A Feature Representation Scheme for Supporting Integrated Manufacturing," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 26, No. 1, pp. 55~71.
- (12) Gindy, N. N. Z., Huang, X. and Ratchev, T. M., 1993, "Feature-Based Component Model for Computer-Aided Process Planning Systems," *Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 20~26.
- (13) Kim, C., Kim, K. and Choi, I., 1993, "An Object-Oriented Information Modeling Methodology for Manufacturing Information Systems," *Computers & Industrial Engineering*, Vol. 24, No. 3, pp. 337~353.
- (14) Kumar, M. and Rajotia, S., 2006, "Integration of Process Planning and Schedule in a Job Shop Environment," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 28, No. 1-2, 109~116.
- (15) Kim, J. K., Park, M. W., Chong, Y. J., 2010, "A Method for Grouping and Sequencing of Machining Processes" *Proceedings of the KSPE 2010 Autumn Conference*, pp. 471~472.
- (16) Choi, H. R., Kim, J. K., Rho, H.-M. and Lee, H. C., 2007, "Multi-Objective Genetic Algorithm for Machine Selection in Dynamic Process Planning," *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, Vol. 24, No. 4, pp. 84~92.