

## 가공시간에 의한 복합특징형상의 가공순서 생성

서영훈\*, 최후곤\*\*

### Machining Sequence Generation with Machining Times for Composite Features

Seo, Y. H.\* and Choi, H. G.\*\*

#### ABSTRACT

For more complete process planning, machining sequence determination is critical to attain machining economics. Although many studies have been conducted in recent years, most of them suggests the non-unique machining sequences. When the tool approach directions(TAD) are considered for a feature, both machining time and number of setups can be reduced. Then, the unique machining sequence can be extracted from alternate(non-unique) sequences by minimizing the idle time between operations within a sequence. This study develops an algorithm to generate the best machining sequence for composite prismatic features in a vertical milling operation. The algorithm contains five steps to produce an unique sequence: a precedence relation matrix(PRM) development, tool approach direction determination, machining time calculation, alternate machining sequence generation, and finally, best machining sequence generation with idle times. As a result, the study shows that the algorithm is effective for a given composite feature and can be applicable for other prismatic parts.

**Key words :** Machining sequence, Composite prismatic features, Tool approach direction, Precedence relation matrix, Machining time, Idle time

#### 1. 서 론

제품 또는 부품들은 다수의 단순특징형상을 포함하고 있는데, 특징형상이란 부품의 형상정보와 가공정보를 포함하여 설계와 제조를 연결하는 효율적인 정보 전달 매개체중 하나이다. 즉 기하학적 및 위상학적 정보를 가지고 부품의 기능성과 가공방법 등을 제공한다. 단순특징형상으로는 through step, blind step, blind slot, through slot, pocket, hole 등이 있으며 복합특징형상(composite feature)은 여러 개의 단순특징형상들의 조합으로 이루어진 것을 의미한다. Dixon<sup>[1]</sup>은 특징형상을 여러 가지 디자인 활동 또는 가공활동, 예를 들어 기능성(functionality), 타당성(feasibility), 구조해석(structure analysis), 공구설계(tool and module design), 계측(metrology) 등에 적합한 기하학적 모양으

로 정의하고 있으며 최두선 등<sup>[2]</sup>은 특징형상을 제조공학적인 중요성을 갖는 제품의 부분으로서 기능성과 제조 또는 가공되는 방법과 같이 특정한 공학적 작업과 직접적인 관련이 있는 공학적 기본요소이며 특정모수들과 기하학적 및 위상학적 요소들이 이루는 상관관계의 조합으로 정의하고 있다.

공정계획의 여러 단계중 가공순서 결정 단계는 도면에서 정의한 형상을 정확히 얻고, 경제적 가공을 위해 반드시 고려되어야 하는 중요한 단계이다. 이는 임의의 형상을 가공하는 것이 다른 형상의 가공에 영향을 미치기 때문에, 기준이 되는 형상보다 다른 형상을 먼저 가공하게 되면, 도면에서 정의한 형상을 정확하게 얻을 수 없는 경우가 발생하여 가공비용을 증가시키기 때문이다. 가공순서의 결정은 주로 공정계획자의 경험에 의존하여 왔고, 그들의 경험적 데이터는 일반적으로 활용될 수 있을 만큼 충분하지 않다<sup>[3]</sup>. 따라서 컴퓨터를 이용한 자동공정계획(창성형 또는 변성형)에 대한 인식이 넓어지는 것과 더불어 공정계획자가 합리적으로 가공순서를 결정할 수 있는 여러 연구

\*학생회원, (주)롯데정보

\*\*중신회원, 성균관대학교 시스템경영공학과

- 논문투고일: 2001. 04. 09

- 심사완료일: 2001. 07. 27

들이 수행되어왔다. Levin과 Dutta<sup>[4]</sup>는 공구접근방향과 형상간의 인접정보를 표현하는 형상연결그래프(feature connectivity graph ; FCG)를 이용하여, 기하학적 우선 순위, 공차에 의한 우선 순위, 실제 가공에서의 우선 순위를 고려하여 형상들의 가공순서를 결정하였고 Somaz와 Khoshnevis<sup>[5]</sup>는 형상들의 가공순서를 결정하기 위하여 형상들의 선후관계를 형상선후관계네트워크(feature precedence network ; FRN)를 이용하였으며 한정현 등<sup>[6]</sup>은 셋업비용과 특징형상의 가공비용, 공구교환비용을 포함한 제조비용 모델을 수립한 뒤, A\* 알고리즘<sup>[7]</sup>을 이용하여 제조비용을 최소화하는 가공방향과 가공순서를 결정하였다. 박철민 등<sup>[8]</sup>과 최두선 등<sup>[9]</sup>은 공구의 접근방향에 의한 셋업순서를 고려하여 가공순서를 결정하였고 이현찬 등<sup>[10]</sup>은 복합 특징 형상들의 가공선후 관계를 위상학적 정렬(topological sort)을 이용하여 1차적인 가공순서를 결정하고 있다. 그러나 이러한 연구들은 가공순서를 결정하기 위하여 기하학적·위상학적 제약조건과 기술적 제약조건만을 고려하고 있을 뿐 셋업변경에 따른 경제적인 제약을 고려하지 않고 있으며, 경제적인 제약을 고려하는 연구들도 대부분 셋업횟수 최소화만

을 고려하여 가공순서를 제시하였다. 이러한 결과로 인하여 이들이 제시하는 가공순서는 대안으로서의 유일하지 않은 가공순서이며 공정계획자가 그중 적절한 순서를 선택해야하는 과제가 남아있다.

본 논문에서는 특징형상간의 기하학적·위상학적 제약에 따른 선후관계와 기하공차 제약에 따른 선후관계, 공정계획자의 경험에 따른 선후관계 등을 고려한 선후관계행렬을 작성하여 가공순서의 대안을 결정하고, 표면조도와 재질의 경도, 공구의 지름, 절삭날의 길이 등을 고려하여 Halevi와 Weill<sup>[10]</sup>이 제시한 가공모수에 의한 가공시간 모델을 제시하였다. 그리고 가공시간 모델에 의하여 특징형상의 공구접근 방향별 가공시간을 계산한 후 셋업횟수 최소화 기준과 유희시간 즉, 가공대기시간을 최소화하는 최선의 가공순서를 유일하게 결정한다. Fig. 1은 최선의 가공순서 및 가공방향을 결정하기 위한 흐름도이다.

## 2. 선후관계에 의한 가공순서 대안 결정

### 2.1 선후관계(precedence relation)

본 논문에서는 선후관계를 세가지 유형으로 구분하였는데, 기하학적·위상학적 제약에 따른 선후관계, 기하공차에 의한 선후관계, 공정설계자의 경험에 의해 결정되는 선후관계로 분류하였다. 기하학적·위상학적 제약에 따른 선후관계는 임의의 특징형상속에 다른 특징형상을 포함하고 있는 경우에 결정되는 선후관계인데, 포함되는 특징형상을 가공하기 위해서 포함하는 특징형상이 먼저 가공되어야만 기준면이 생성되어 가공의 선후관계가 발생하는 제약을 뜻하고, 기하공차에 의한 선후관계는 임의의 특징형상면이 다른 특징형상의 가공 기준면(operational reference)이 될 경우에는 기준면이 되는 특징형상을 먼저 가공하여야 한다는 것을 의미한다. 공정설계자의 경험에 의해 결정되는 선후관계는 보다 경제적인 가공을 위하여 또는 가공환경의 변화에 따라 공정설계자가 부여하는 제약이다.

### 2.2 가공순서의 결정

#### 2.2.1 선후관계행렬(precedence relation matrix ; PRM)

선후관계행렬(PRM)은 위에 설명한 세가지 유형의 선후관계를 나타낸 행렬로서 Table 1에서 나타낸 바와 같이  $n \times n$ (단,  $n$ 은 특징형상의 개수) 행렬의 형태로 표현되며, PRM의 요소( $i, j$ )는 특징형상  $i$ 와  $j$ 사이의 가공 선후관계를 나타낸다. 여기서 선후관계는 다음과 같은 특정한 부호로 표시한다.

- (1) G: 기하학적·위상학적 제약에 의한 선후관계

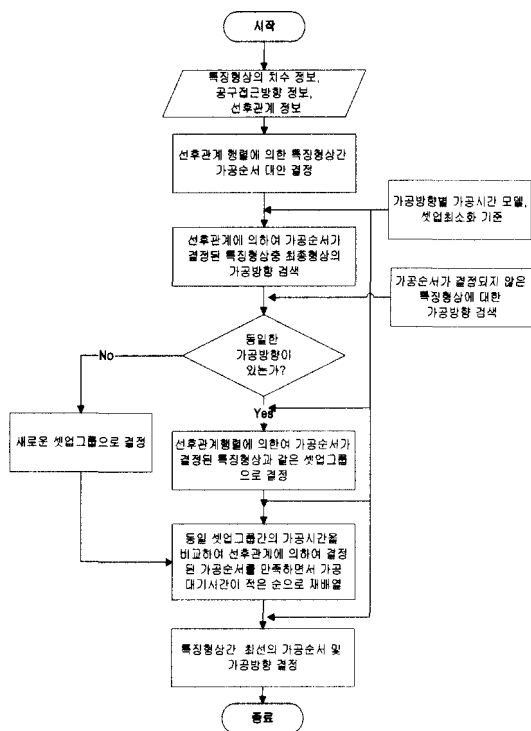


Fig. 1. Flow chart for generating the best machining sequences and tool approach directions.

Table 1. Precedence relation matrix

i \ j	1	2	3	...	n	SCF	SEQ
1		G				1	
2			E			1	
3						0	
⋮						⋮	
n	T					1	
SRF	1	1	1	...	0		

i : 선가공 특징형상, j : 후가공 특징형상

- (2) T: 기하공차 제약에 의한 선후관계
- (3) E: 공정설계자의 경험에 의한 선후관계
- (4) SRF(Sum of Row Features): 각 행(row)에 표시된 부호 개수의 합을 나타낸다. SRF의 값이 0이면, 이 값에 해당하는 열의 특징형상 j를 가공하기 위하여 먼저 가공해야 하는 특징형상이 없다는 것을 의미하기 때문에, 특징형상 j를 가장 먼저 가공한다는 의미이다.
- (5) SCF(Sum of Column Features): 각 열(column)에 표시된 부호 개수의 합을 나타낸다. SCF의 값이 0이면, 이에 해당하는 행의 특징형상 보다 나중에 가공되는 형상이 없음을 의미한다.
- (6) SEQ(SEquence): 특징형상의 가공순서를 나타내며, 가공순서는 오름차순으로 결정한다.

임의의 요소(i, j)가 공란이면 특징형상 i와 j 사이에는 가공의 선후관계가 없음을 의미하고, 특정한 선후관계 부호가 있으면 그 선후관계의 제약에 따라 가공형상 i는 j보다 먼저 가공되어야 함을 의미한다.

2.2.2 가공순서 결정 알고리즘

선후관계 행렬을 이용하여 가공순서를 결정하는 알고리즘은 다음의 6단계로 결정된다. 이 알고리즘의 특징은 선후관계의 제약이 많을수록 특징형상의 가공순서가 명확하게 또는 유일하게 결정된다는 점이다.

단계 1 : 선후관계행렬(PRM)을 작성한다.

단계 2 : SRF, SCF값을 계산한다.

단계 3 : 단계 1에서 작성된 선후관계행렬에서 임의의 특징형상 k에 대하여 SRF와 SCF가 모두 0인 특징형상은 선후관계가 없는 형상이다. 그러므로 하나의 가공순서안에서 어느 위치에 있어도 상관없다는 의미이기 때문에 인덱스 f(free ; i=1, 2, ..., n)를 SEQ에 부여하고 PRM에서 제거한다.

단계 4 : SRF값이 0인 특징형상 k를 찾는다.

- 1)  $SRF_k=0$ 인 특징형상 k가 한개인 경우 k와 같은

특징형상 i의 SEQ에 순서 인덱스  $M(M=1, 2, \dots, n)$ 을 부여하고 PRM에서 제거한다.

- 2)  $SRF_k=0$ 인 특징형상 k가 두 개 이상인 경우 그때의 k와 같은 i의 SCF 값 중에서 제일 큰 값을 가지는 i를 선택하여 SEQ에 순서인덱스  $M(M=1, 2, \dots, n)$ 을 부여하고 PRM에서 제거한다.

- 3)  $SRF_k=0$ 인 열이 두 개 이상이고 그때의 k와 같은 i의 SCF값 중에서 제일 큰 값을 가지는 형상 역시 두 개 이상일 경우에는 여러 개의 순서가 산출됨으로 SEQ에 순서인덱스  $S_i(i=1, 2, \dots, m)$ 을 부여하고 PRM에서 제거한다.

단계 5 :  $SRF_k=0$ 이고  $SCF_k \neq 0$ 인 특징형상이 존재하면 SEQ에 M+1을 한 후 PRM에서 제거한 후 단계 6으로 가고,  $SRF_k=0$ 이고  $SCF_k=0$ 인 특징형상이 두 개 이상 존재한다면 SEQ에 순서인덱스  $S_i(i=m+1, m+2, \dots, n)$ 를 부여하고 PRM에서 제거한 후 단계 6

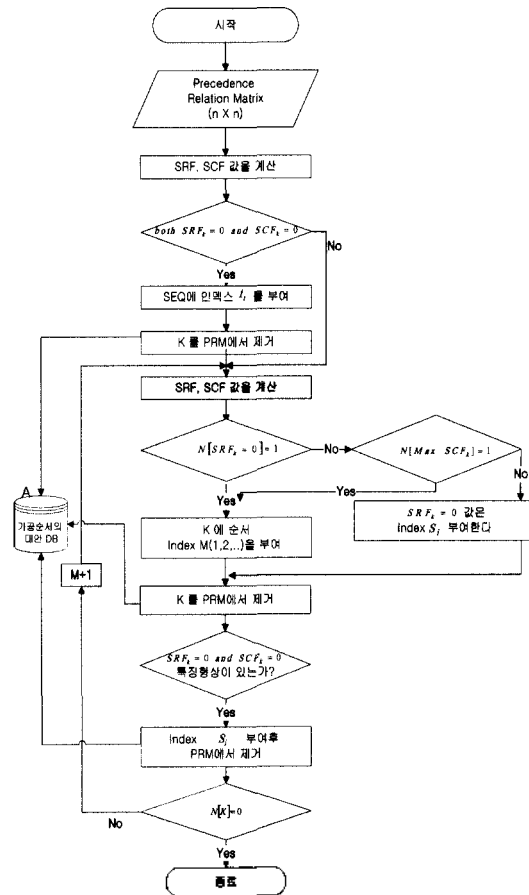


Fig. 2. Flow chart for determining unique machining sequence.

으로 간다.

단계 6 : SEQ에 순서가 결정되지 않은 특징형상이 존재하면 SRF, SCF 값을 계산한 후, 단계 4로 가고 그렇지 않으면 종료한다.

가공순서 결정 알고리즘의 단계 중 단계 4와 단계 5에서 순서 인덱스  $S_i$ 가 부여된 특징형상들에 대해서는 가공우선순위가 유일하게 결정될 수 없기 때문에 2.4절에서 설명되는 알고리즘에 의해 가공순서가 결정된다. Fig. 2는 가공순서를 결정하기 위한 흐름도이다.

**2.3 가공순서가 결정된 특징형상의 가공방향 결정**

가공순서가 결정된 특징형상들이 가공되기 위해서는 셋업방식이 결정되어야 하며 이는 공구의 접근방향 (Tool Approach Direction; TAD)이 결정되어야 한다는 의미이며 그 방향은 다시 특징형상의 가공시간을 결정한다. 즉 형상의 치수(가공길이)에 따라 가공시간이 달라지며, 가공시간이 되도록 짧은 방향을 선택한다고 가정하고 공구접근방향이 공구축방향과 반대이면 현재의 셋업을 변경할 필요가 없으며 그 외의 경우에는 새로운 셋업을 필요로 하여 셋업의 횟수가 증가하게 된다. 이는 셋업횟수를 되도록 줄이는 방향으로 가공순서를 결정할 때 직접적인 영향을 주게 된다. 따라서 공구접근방향에 따른 특징형상의 가공시간은 가공순서결정에 핵심적인 역할을 한다.

가공순서가 결정된 특징형상의 가공방향을 결정하기 위해서는 가공순서가 결정된 형상들의 공구접근 방향을 검색하여, 연속적으로 공구접근방향을 공유하고 있는 공구접근 방향 개수에 따라 가공방향을 다음과 같이 결정한다.

- ① 공유하고 있는 공구 접근 방향의 개수가 한 개인 경우 : 선후관계행렬에서 가공순서가 결정된 특징형상간에 한 개만의 공구접근 방향을 공유하고 있는 경우에는 공유하고 있는 방향으로 특징형상들의 가공방향이 결정된다.
- ② 공유하고 있는 공구 접근 방향의 개수가 두 개 이상인 경우 : 선후관계행렬에서 가공순서가 결정된 특징형상간에 두 개이상의 공구접근 방향을 공유하고 있는 특징형상들의 가공방향은 공유 방향별 가공시간의 합을 구하여 가공시간의 합이 적은 방향으로 결정된다.
- ③ 공유하고 있는 공구 접근 방향이 없는 경우 : 선후관계행렬에서 가공순서가 결정된 특징형상간에 공유하고 있는 공구접근 방향이 없는 경우에는, 각각의 특징형상별로 공구접근방향별 가공시간을 계산한 후 가공시간이 가장 적은 방향을 결정한다.

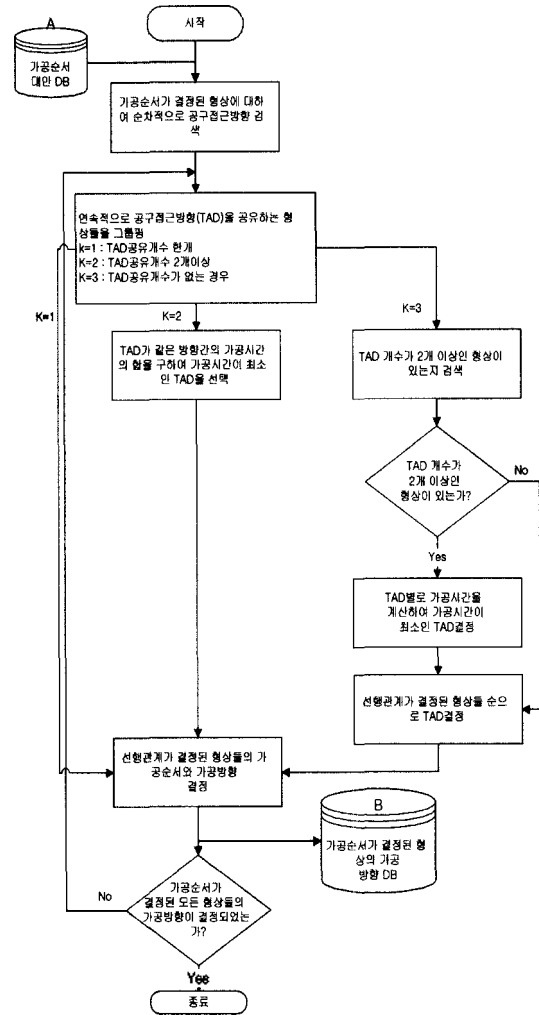


Fig. 3. Flow chart for determining tool approach directions.

Fig. 3은 선후관계행렬에 의해 가공순서가 결정된 특징형상들의 가공방향을 결정하는 과정을 나타낸다.

**2.4 가공순서가 결정되지 않은 특징형상의 가공순서 및 가공방향 결정**

2.2절에 제시된 알고리즘을 적용했을 때 여러 개의 가공순서가 산출되어 가공순서가 명확히 결정되지 않은 특징형상들에 대한 가공순서 및 가공방향을 결정하는 단계는 다음과 같으며 Fig. 4의 흐름도로 나타내었다.

단계 1 : 가공방향 및 가공순서가 결정된 최종 특징형상의 가공방향을 결정한다.

단계 2 : 가공순서가 결정되지 않은 특징형상 중 단계 1에서 결정된 가공방향과 동일한 공구 접근방향을 가지는 특징형상을 찾는다.

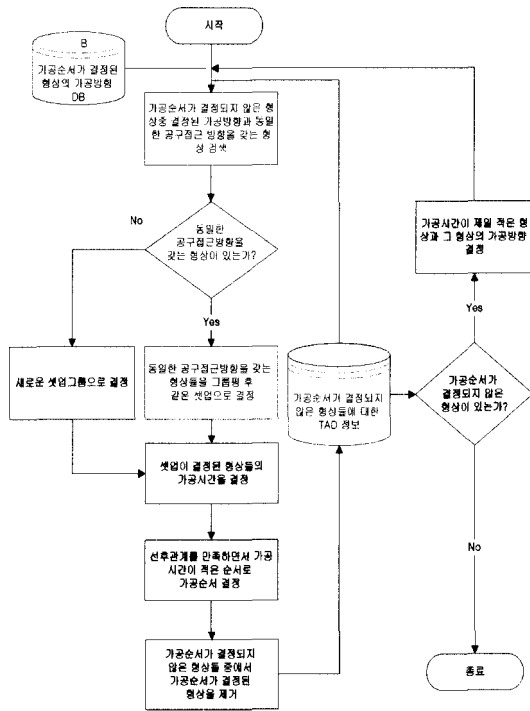


Fig. 4. Flow chart for determining unique machining sequence from non-unique machining sequences.

단계 3 : 동일한 공구 접근방향을 가지는 특징형상이 있으면 그룹핑하여 같은 셋업그룹으로 결정한 후 단계 4로 가고, 동일한 공구 접근방향을 가지는 특징형상이 없으면 단계 7로 간다.

단계 4 : 셋업이 결정된 특징형상들의 가공시간을 검색하여 선후관계를 만족하면서, 형상들의 가공시간에 의해 발생하는 형상과 형상사이의 유희시간(waiting time)을 최소화하는 순서로 가공순서를 재결정한다.

단계 5 : 가공순서가 결정되지 않은 특징형상 중에서 단계 4에서 가공순서가 결정된 특징형상을 제거한다.

단계 6 : 가공순서가 결정되지 않은 특징형상이 존재하면 단계 7로 가고 그렇지 않으면 종료한다.

단계 7 : 가공순서가 결정되지 않은 특징형상 중에서 가공시간이 가장 적은 특징형상과 그 특징형상의 가공 방향을 결정한 후 단계 2로 간다.

Fig. 5는 선후관계가 있으면서 가공순서가 결정되지 않은 특징형상의 가공순서 및 가공방향을 결정하기 위한 복합특징형상의 예이다. 선후관계행렬의 알고리즘에 의하여 가공순서가 특징형상 F1, F2 순서로 유일하게 결정되었고 F3, F4는 가공순서가 유일하게 결정되

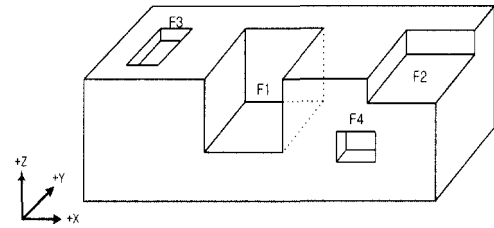


Fig. 5. A composite feature for generating non-unique machining sequences.

지 않는다고 가정하고(즉 두 개의 순서 F3→F4, F4→F3), 가공순서가 결정된 특징형상 F1, F2의 가공방향이 -Z방향으로 결정되었다고 가정한다. 가공순서가 결정되지 않은 특징형상 F3, F4의 공구접근 방향을 검색하면 F3은 -Z방향, F4는 +Y방향의 공구접근 방향을 가지고 있다. 따라서 가공순서가 결정된 특징형상의 F1, F2의 가공방향과 동일한 공구접근 방향을 가지는 F3를 동일 셋업으로 그룹핑하고, 그렇지 않은 특징형상 F4는 새로운 셋업그룹으로 결정한다. 그리고 동일 셋업그룹내 가공시간을 비교하여 선후관계행렬에서 결정된 가공순서를 만족하고, 유희시간을 고려하여 가공을 위해 대기하는 시간을 최소화하기 위하여 가공시간이 적은 순서로 재배열한다. 자세한 방법은 2.5.5절과 3.3.1절에서 설명된다. 각 형상을 가공할 때 발생하는 유희시간은 현재의 형상(예: F1)을 가공하기 위해 필요한 시간(service time)이 되는데 순서상의 다음 형상(예: F2)은 그 시간만큼 기다려야 하기 때문이다.

2.5 가공시간 모델

동일한 공구접근방향을 가지는 특징형상들을 찾아 그룹핑하고 가공순서의 대안들 중에서 유희시간을 고려하여 경제적 가공을 달성하는 최선의 가공순서를 결정하기 위하여 공구접근 방향에 따른 최소 작업대 이동횟수(minimum number of passes)를 결정하는 방법과 표면조도를 고려한 가공시간 모델을 제시한다. 즉, 형상별로 작업대 이동횟수를 되도록 줄이고 주어진 표면조도를 만족시키는 가공시간을 구하면 형상간의 유희시간을 결정하는데 이용되어 경제적 가공을 달성할 수 있다.

2.5.1 최소 작업대 이동횟수의 결정

도면에서 제시하고 있는 특징형상의 표면조도를 만족시키기 위하여 밀링작업을 황삭(rough cut)과 정삭(finish cut)으로 구분하고, 각각의 작업에 따른 최소 작업대이동횟수를 결정하기 위하여 특징형상의 치수, 공구의 지름, 공구 날의 길이 정보를 활용한다. 밀링작업

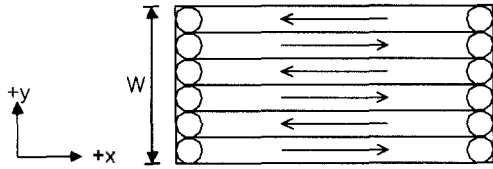


Fig. 6. Tool path.

에서 황삭작업은 작업대가 가장 빠른 속도로 다회 이동(multi-pass)하며 절삭하는 작업이며 매 이동후 얻는 치수와 표면조도의 만족여부보다는 공구수명의 연장을 경제적 가공의 주요요소로 고려하는 작업이며, 정삭작업은 작업대의 이송속도를 줄여 도면에 주어진 치수와 표면조도를 만족시키기 위한 작업이다. 본 논문에서 정삭작업은 작업대의 1회 이송(single pass)으로 충분하다고 가정하고 있다.

2.5.2 황삭작업에서 최소 작업대 이동횟수

최소 작업대 이동횟수를 결정하기 위하여 황삭의 경우는 작업대의 다회 이동을 고려하고 1회 절삭깊이는 절삭날 길이의 반으로 결정하였다<sup>[11]</sup>. Fig. 6은 공구의 진행 경로의 예이며 이동경로간의 중복이 없으므로 6회 이동으로 한 면의 가공이 끝나는 경우이다. Fig. 7은 평엔드밀의 공구지름(D)과 절삭날의 길이(Lc)를 보여준다.

황삭작업에서 최소 작업대 이동횟수는 식 (1)에 의해 결정되며 황삭작업에서 전체 절삭깊이는 특징형상의 높이(H)와 정삭작업에서 최대절삭깊이( $d_f$ )<sup>[10]</sup>의 차로 결정된다. Fig. 6과 같은 경우에 식 (1)의 앞부분은 형상의 폭을 공구지름으로 나눈 값을 정수화하여 공구이동횟수를 정하는 부분이며, 뒷부분은 형상의 높이에서 1회 정삭가공을 위하여 남겨 놓아야 하는 높이를 뺀 값을 황삭가공에서의 1회 절삭깊이인 절삭날 길이의 반으로 나눈 값을 정수화한 부분이다. 즉, 수평이동횟수와 수직이동횟수인 두 값을 곱하면 최소 작업대

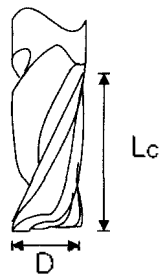


Fig. 7. Tool diameter and length of a flat end mill.

이동횟수가 된다.

$$N_p = \left\lceil \left( \frac{W}{D} + 1 \right) \times \left[ (H - d_f) + \left( \frac{L_c}{2} \right) \right] \right\rceil \tag{1}$$

$$d_f = (0.11R_a^{1.4} + 0.3) \left( \frac{200}{BHN} \right)^{0.6}$$

여기서

- $N_p$  : 최소 작업대 이동횟수
- $D$  : 공구 지름(mm)
- $H$  : 특징형상의 높이(mm)
- $W$  : 특징형상의 폭(mm)
- $L_c$  : 절삭날 길이(mm)
- $R_a$  : 표면조도( $\mu\text{m}$ )
- $BHN$  : 피삭재의 Brinell 경도
- $\lceil \cdot \rceil$  : 정수
- $d_f$  : 정삭작업의 최대 절삭깊이

2.5.3 정삭작업에서 최소 작업대 이동횟수

본 논문에서 정삭작업은 황삭작업 이후 도면의 치수와 표면조도를 만족시키기 위한 작업으로 주어진 가공면의 가공깊이에 대해 작업대가 1회 이동하여 주어진 공차와 조도를 만족시킨다고 가정하였다. 이러한 가정은 평엔드밀을 이용한 밀링가공이기 때문에 가능하다. 따라서 각 특징형상의 가공을 위한 최소 작업대 이동횟수는 형상의 가공면적에 의해 결정된다.

$$N_p = \left\lceil \left( \frac{W}{D} + 1 \right) \right\rceil \tag{2}$$

여기서

- $N_p$  : 최소 공구이동횟수
- $D$  : 공구 지름(mm)
- $W$  : 특징형상의 폭(mm)
- $\lceil \cdot \rceil$  : 정수

2.5.4 가공시간의 결정

본 논문에서는 Halevi와 Weill<sup>[10]</sup>이 제시한 표면조도와 재질의 경도에 의해 결정되는 가공모수를 이용하며 식 (3)과 (4)는 밀링작업에 적용되는 절삭속도와 이송량을 결정한다. 재질의 경도(BHN)가 높을수록 절삭속도와 이송량은 낮아지며 특히 이송량의 결정에 지대한 영향을 끼친다. 식 (3)과 (4)를 공구 1회 이동시 가공시간 결정식에 대입하면 식 (5)의 아래 부분을 얻게된다.

(1) 절삭속도(min/m)

$$v_c = \frac{3293}{BHN^{0.6} \cdot a_f^{0.3}} \tag{3}$$

(2) 이송량(mm/rev)

$$f = \frac{3.14(R_a \cdot D)^{0.4}}{BHN \cdot a_r^{0.3}} \quad (4)$$

(3) 공구 1회 이동시 가공시간

$$T = \frac{m_i}{n \cdot f} = \frac{\frac{\pi \cdot D}{2} m_i}{1000 v_c \cdot f}$$

$$= \frac{\pi \cdot D^{0.6} \cdot m_i \cdot BHN^{1.6} (L_c/2)^{0.46}}{20743.22 \times 10^3 \cdot R_a^{0.4}} \quad (5)$$

여기서

$a_r$  : 절삭깊이(mm)

$m_i$  : 공구이동길이(mm)

$D$  : 공구의 지름(mm)

BHN : 자재의 Brinell 경도

$L_c$  : 절삭날의 길이(mm)

$n$  : 공구날당 회전속도( $n = v_c / \pi D$ )

$R_a$  : 표면조도( $\mu\text{m}$ )

공구이동 길이( $m_i$ )는 특징형상의 종류에 따라 다르게 적용된다. Fig. 8은 특징형상의 종류에 따라 공구이동길이가 다르게 적용되는 예를 보여주고 있다. 한 예로 blind slot의 경우, 가공방향의 특징형상 치수(L)에서 공구의 반지름을 빼준 길이가 실제 공구이동 길이가 된다. 따라서 특징형상의 종류에 따른 실제 공구이동길이를 수식으로 나타내면 아래와 같다.

$$m_i = L - D/2 : \text{blind step, blind slot} \quad (6)$$

$$m_i = L - D : \text{pocket} \quad (7)$$

$$m_i = L : \text{through slot, through step} \quad (8)$$

가공시간 모델은 황삭 가공시간과 정삭 가공시간의 합으로 식 (9)와 같이 표현되며, 가공시간  $T_{ij}$ 는 공구 접근방향  $i$ 에서 특징형상  $j$ 를 가공하는데 걸리는 시간을 의미한다.

$$T_{ij} = T_{r_{ij}} + \delta_j T_{f_{ij}} \quad (9)$$

여기서

$T_{ij}$  : 전체 가공시간(min)

$T_{r_{ij}}$  : 황삭 가공시간(min)

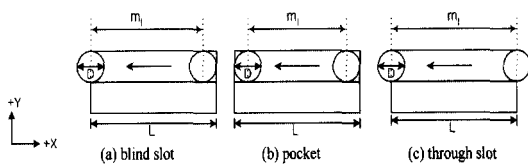


Fig. 8. Tool pass lengths for various features.

$T_{f_{ij}}$  : 정삭 가공시간(min)

$i$  : 공구접근방향

$j$  : 특징형상 번호

$\delta_j = 0$  :  $R_a$  값이  $5 \mu\text{m}$  이상인 경우

$\delta_j = 1$  :  $R_a$  값이  $5 \mu\text{m}$  미만인 경우

결정변수  $\delta_j$ 의 결정기준을 표면조도 값  $5 \mu\text{m}$ 로 정한 것은 가공공구를 엔드밀로 가정하였기 때문이다. 핸드북<sup>[11]</sup>에 의하면 밀링작업에서 황삭이 만족시킬 수 있는 표면조도의 최소값은  $5 \mu\text{m}$ 이며,  $5 \mu\text{m}$ 보다 작은 표면조도를 만족하기 위해서는 정삭이 필요하다. 따라서 특징형상의 표면조도 값이  $5 \mu\text{m}$  이상일 경우,  $\delta_j$ 는 0이 되고,  $5 \mu\text{m}$ 미만일 경우,  $\delta_j$ 는 1이 된다.

황삭 가공시간과, 정삭 가공시간은 식 (1), (2), (5)에 의해서 다음과 같이 정리된다.

(1) 황삭 가공시간

$$T_{r_{ij}} = \frac{\pi \cdot D^{0.6} \cdot m_{ij} \cdot BHN^{1.6} \cdot (L_c/2)^{0.46}}{20743.22 \times 10^3 \times \{5^{0.4} \delta_j + R_a^{0.4} (1 - \delta_j)\}}$$

$$\times \left| \frac{W_{ij}}{D} + 1 \right| \left| \frac{H_{ij} - \delta_j (0.11 R_a^{1.4} + 0.3) \left( \frac{200}{BHN} \right)^{0.6}}{L_c/2} + 1 \right| \quad (10)$$

(2) 정삭 가공시간

$$T_{f_{ij}} = \frac{\pi \cdot D^{0.6} \cdot m_{ij} \cdot BHN^{1.6} \cdot \left\{ (0.11 R_a^{1.4} + 0.3) \left( \frac{200}{BHN} \right)^{0.6} \right\}^{0.46}}{20,743.22 \times 10^3 \times R_a^{0.4}}$$

$$\times \left| \frac{W_{ij}}{D} + 1 \right| \quad (11)$$

### 2.5.5 유휴시간 최소화 알고리즘

하나의 밀링기계가 특징형상들을 가공할 때, 각 형상의 가공시간은 식 (10) 또는 식 (11)로 결정되는데 실제 가공이 완료되는 시간은 하나의 공구가 하나의 형상을 절삭한 뒤 순서상의 다음 형상을 가공함으로써 형상과 형상간에 공구가 유휴할 때까지 기다리는 유휴시간을 포함해야한다. 이는 한 대의 기계가 여러 개의 제품을 가공할 때 가공순서를 결정하는 일정계획 문제가 된다. 주어진 성능지표, 예를 들어 평균 완료시간(mean completion time), 평균 납기지연일수(mean tardiness) 등을 최소화하는 일정계획 규칙을 각 형상의 가공순서, 특히 유일하게 결정되지 않는 가공순서에서 최선의 가공순서를 추출하는 경우에 적용할 수 있다. 많은 일정계획 규칙들<sup>[12]</sup> 중에서, SPT(shortest processing time) 규칙은 최적화 규칙으로서 평균 완료시간을 최소화하는 규칙이다. 즉, 한 대의 기계가 여러 작업을 수행할 때 가공시간을 오름차순으로 정리하고 각 가공시

간에 해당되는 작업을 순서로 택하면 작업과 작업사이의 유휴시간을 최소화함으로써 평균 완료시간을 최소화시킨다. 본 논문에서는 가공순서가 유일하게 결정되지 않은 사례에서 최선의 순서를 추출하기 위해 SPT 규칙을 적용한다. 즉, 하나의 공구가 여러 개의 형상을 모두 가공할 때, 각 형상에 대해 식 (10) 또는 식 (11)로 결정되는 가공시간을 오름차순으로 정리하고, 이에 해당하는 형상을 순서대로 가공하면 형상간의 공구의 유휴시간을 최소화시키는 것이다.

**3. 적용사례**

최선의 가공순서와 가공방향을 생성하는 알고리즘을 Fig. 9와 같은 복합특징형상의 예에 적용한다. Fig. 10은 밀링작업에서 제거해야 할 부피(volume)의 치수 정보를 나타낸다.

**3.1 선후관계행렬을 이용한 가공순서 대안 결정**

**3.1.1 선후관계 행렬**

특징형상 F1, F2와 F1, F3은 기하공차에 의한 선후관계가 있으며, 특징형상 F4와 F5는 기하학적·위상학적관계에 의한 선후관계가 있다. 이러한 정보를 이용하여 선후관계행렬을 작성하면 Table 2와 같이 구성

된다. T는 기하공차 제약, 즉 평행도(//)에 대한 제약이며, G는 기하학적·위상학적 제약이다. 형상 F1과 F2는 T제약이 있는데, 이는 F2가 주어진 평행도를 만족시키며 가공되기 위해서 F1이 우선 가공되어 F2의 평행도가 만족되도록 참조면을 제공해야 한다는 의미이다. 형상 F4와 F5는 G제약이 있는데 위상학적으로 F4가 먼저 가공되어야만 F5가 가공될 수 있다는 의미이다.

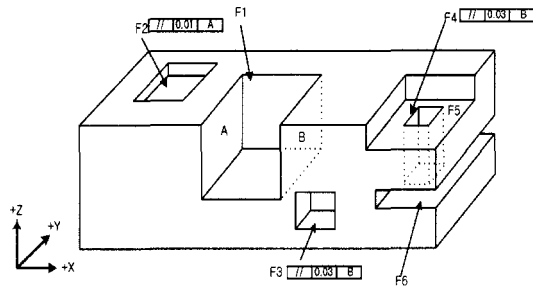
**3.1.2 가공순서 대안 결정**

가공순서 대안 결정 알고리즘을 특징형상에제에 적용하면, 특징형상 F1, F4의 가공순서는 유일하게 결정

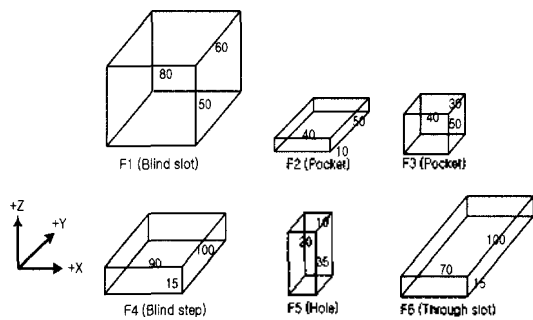
**Table 2.** Precedence relation matrix for a composite feature

형상 번호	1	2	3	4	5	6	SCF	SEQ
1		T	T	T			3	
2							0	
3							0	
4					G		1	
5							0	
6							0	f1
SRF	0	1	1	1	1	0		

f<sub>1</sub>: free feature(' SRF<sub>6</sub>=SCF<sub>6</sub>=0)



**Fig. 9.** Precedence relations in a composite feature.



**Fig. 10.** Dimensions of a composite feature.

**Table 3.** Non-unique machining sequences for a composite feature

번호	가공순서	번호	가공순서
1	F1, F4, F2, F3, F5, F6	19	F1, F4, F6, F3, F5, F2
2	F1, F4, F2, F3, F6, F5	20	F1, F4, F6, F3, F2, F5
3	F1, F4, F2, F5, F3, F6	21	F1, F4, F6, F5, F3, F2
4	F1, F4, F2, F5, F6, F3	22	F1, F4, F6, F5, F2, F3
5	F1, F4, F2, F6, F3, F5	23	F1, F4, F6, F2, F3, F5
6	F1, F4, F2, F6, F5, F3	24	F1, F4, F6, F2, F5, F3
7	F1, F4, F3, F2, F5, F6	25	F6, F1, F4, F2, F3, F5
8	F1, F4, F3, F2, F6, F5	26	F6, F1, F4, F2, F5, F3
9	F1, F4, F3, F5, F2, F6	27	F6, F1, F4, F3, F2, F5
10	F1, F4, F3, F5, F6, F2	28	F6, F1, F4, F3, F5, F2
11	F1, F4, F3, F6, F2, F5	29	F6, F1, F4, F5, F2, F3
12	F1, F4, F3, F6, F5, F2	30	F6, F1, F4, F5, F3, F2
13	F1, F4, F5, F3, F2, F6	31	F1, F6, F4, F2, F3, F5
14	F1, F4, F5, F3, F6, F2	32	F1, F6, F4, F2, F5, F3
15	F1, F4, F5, F2, F3, F6	33	F1, F6, F4, F3, F2, F5
16	F1, F4, F5, F2, F6, F3	34	F1, F6, F4, F3, F5, F2
17	F1, F4, F5, F6, F3, F2	35	F1, F6, F4, F5, F2, F3
18	F1, F4, F5, F6, F2, F3	36	F1, F6, F4, F5, F3, F2



Table 4. Machining times depending on tool approach directions for a composite feature

특징형상	공구접근방향	길이 (mm)	폭 (mm)	높이 (mm)	황삭가공시간 (min)	정삭가공시간 (min)	전체가공시간 (min)
F1	+Y	80	50	60	13.42	1.04	14.46
	-Z	80	60	50	13.67	1.27	14.94
F2	-Z	40	50	10	0.99	0.46	1.45
F3	+Y	40	50	30	2.96	0.46	3.42
F4	-X	15	100	90	5.93	0.30	6.23
	+Y	90	15	100	8.43	0.39	8.82
	-Z	90	100	15	9.55	2.21	11.76
F5	-Z	20	10	35	0.63	0.04	0.40
F6	-X	15	100	70	5.76	0.38	6.14
	+Y	70	15	100	6.78	0.31	7.09
	-Y	70	15	100	6.78	0.31	7.09

되고 F2, F3, F5의 가공순서는 선후관계행렬에 의해 유일하게 결정되지 않는다. 그리고 F6은 선후관계가 존재하지 않기 때문에 어느 순서에 위치해도 상관이 없다. 따라서 총 가공 순서 대안의 수는 Table 3과 같이 36개이다. 36개의 가능한 가공순서 중 최선의 가공순서를 결정하는 것은 공정계획자에게 보다 경제적이며 합리적인 가공순서를 제시한다는 측면에서 중요한 과제이다. 이를 위하여 본 논문에서는 순서상의 각 형상에 대하여 공구접근방향에 따라 가공시간을 계산하고 형상과 형상사이의 유희시간을 최소화시키는 순서를 최선의 가공순서로 제시한다.

### 3.2 특징형상의 공구접근방향별 가공시간

Fig. 9에 보인 예제에 대하여 공구 접근방향별 가공시간을 결정하기 위해서 절삭공구는 6Φ 평엔드밀, 절삭날의 길이는 20 mm, 피삭재 재질의 경도(BHN)는 200, 만족시켜야 하는 표면조도는 0.8 μm로 가정한다.

각 특징형상에 대한 공구접근방향별 가공시간을 계산하면 Table 4와 같이 정리된다.

### 3.3 최선의 가공순서 생성

#### 3.3.1 가공순서가 결정된 특징형상(F1, F4)의 가공방향 결정

가공순서가 결정된 특징형상 F1, F4가 공유하고 있는 공구접근 방향의 개수를 검색하면 두 개(+Y, -Z)로서 가공을 위해 대기하는 시간을 최소화하기 위하여 가공시간이 적은 순서로 재배열한다. 즉, 적용사례에서 +Y방향으로 그룹핑되는 형상들은 F1, F4, F3, F6이며 이들 중 F1과 F4는 가공순서가 결정되어 있고 F3와 F6는 유일하게 고정되지 않는다. 따라서 유희시간을 고

려하면 +Y방향에서 F3의 가공시간은 3.42분이고 F6의 가공시간은 7.09분이다. 만약 F6을 먼저 가공한 후 F3을 가공한다면 F3은 가공 받기 위해 7.09분을 대기해야하고 반대인 경우, F6이 대기하는 시간은 3.42분이다. 따라서 유희시간을 최소화하는 가공순서는 F3→F6가 된다. 결국 +Y방향으로 그룹핑된 특징형상간 최선의 가공순서는 F1→F4→F3→F6이 되고 -Z방향으로 F5→F2가 추가된다. 따라서 최선의 가공순서는 다음과 같다.

F1(+Y)→F4(+Y)→F3(+Y)→F6(+Y)→F5(-Z)  
→F2(-Z)

## 4. 결 론

본 논문에서는 가공순서 결정 시 이용할 수 있는 선후관계를 분류/정의하고 선후관계행렬을 이용하여 결정된 가공순서의 대안에 대하여 특징형상 데이터와 가공지식을 이용함으로써 최선의 가공순서를 생성하는 알고리즘을 제시하였으며, 이 알고리즘은 현실적인 제조환경을 고려한 최적의 가공순서를 결정하기 위한 연구의 출발점이 될 수 있을 것이며, 또한 보다 합리적인 자동공정계획 시스템 구현에 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

본 논문은 각주형 특징형상만을 고려하여 수행함으로써 회전형 부품과 판형 부품에 대한 고려가 없었으며 선후관계를 입력함으로써 완전한 자동화를 달성하지 못하였다. 또한 가공공구를 평엔드밀로 제한함으로써 공구교환에 대한 고려가 없었으며 최선의 가공순서 생성을 위해 유희시간만을 고려한 한계점을 가지고 있

다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 다음과 같은 후 연구가 수행되어야 한다.

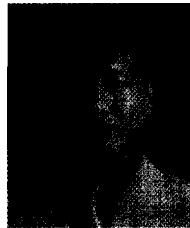
- ① 형상인식과 연계시킬 수 있는 모듈 개발
- ② 회전형 부품과 관형 부품을 고려한 가공순서 결정 알고리즘 개발
- ③ 공구에 관련된 데이터 베이스 구축
- ④ 납기일정 등 모든 생산일정을 고려한 가공순서 결정 알고리즘 개발

### 참고문헌

1. Dixon, J. R., "Research in Designing with Features," *Design Theory*, June, 1988.
2. 최두선, 신보성, 이호영, "특징형상을 이용한 가공순서 및 셋업 결정에 관한 연구," 1999년도 학술발표회 논문집, 한국 CAD/CAM 학회, pp. 349-352, 1999.
3. Wang, H. P. and Li, J. K., *Computer-Aided Process Planning*, Chaps. 2, 4 and 8, Elsevier Science Publishers, 1991.
4. Levin, J. B. and Dutta, D., "PMPS: A Prototype CAPP System for Parallel Machining," *Transactions of the ASME*, Vol. 118, pp. 406-414, 1996.
5. Sormaz, D. N. and Khoshnevis, B., "Process planning knowledge representation using an object-oriented data model," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 10, No. 1-4, pp. 92-104, 1997.
6. 한정현, 한인호, 강무진, "가공비용 최소화를 위한 특징형상 인식," 2000년도 학술발표회 논문집, 한국 CAD/CAM 학회, pp. 319-327, 2000.
7. Hart, P. E., Nilsson. N. J., and Raphael, B., "A formal basis for the heuristic determination of minimum cost paths," *IEEE Transactions on SSC4*, pp. 100-107, 1968.
8. 박철민, 노형민, 이수홍, "특징형상을 이용한 set-up

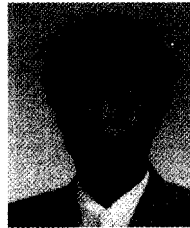
순서 결정 및 공정분할도의 자동 생성," 1998년도 춘계학술대회 논문집, 한국정밀공학회, pp. 1031-1036, 1998.

9. 이현찬, 이재현, "특징형상 인식을 통한 창성적 자동공정계획 수립," 한국CAD/CAM 학회 논문집, pp. 274-282, 1998.
10. Halevi, G. and Weill, R. D., *Principles of Process Planning*, Chaps. 13 and 14, Chapman & Hall, Inc., 1995.
11. Technical Staff of the Machinability Data Center, *Machining Data Handbook*, 3rd Edition, Vol. 1, Chap. 2, Metcut Research Associates Inc., 1980.
12. Sule, D. R., *Industrial Scheduling*, PWS Publishing Company, Chap. 2, 1997.



### 서영훈

1999년 성균관대학교 산업공학과 학사  
2001년 성균관대학교 대학원 산업공학과 석사  
2001년~현재 롯데정보시스템  
관심분야: CAPP, CIMS, 시스템 통합



### 최후곤

1975년 서울대학교 공과대학 산업공학과 학사  
1979년 서울대학교 대학원 산업공학과 석사  
1985년 Iowa State University 산업공학과 석사·박사  
1985년~현재 성균관대학교 시스템경영공과부 부교수, 교수  
관심분야: CAPP, CIMS, 시스템통합, 신제품개발