

특징형상 인식을 통한 창성적 자동 공정계획 수립¹⁾ - 복합특징형상 분류를 중심으로 -

이현찬*, 이재현*

Generative Process Planning through Feature Recognition

Hyun Chan Lee* and Jae Hyun Lee*

ABSTRACT

A feature is a local shape of a product directly related to the manufacturing process. The feature plays a role of the bridge connecting CAD and CAM. In the process planning for the CAM, information on manufacturing is required. To get the manufacturing information from CAD data, we need to recognize features. Once features are recognized, they are used as an input for the process planning. In this paper, we thoroughly investigate the composite features, which are generated by interacting simple features. The simple features in the composite feature usually have precedence relation in terms of process sequence. Based on the reason for the precedence relation, we classify the composite features for the process planning. In addition to the precedence relation, approach direction is used as an input for the process planning. In the process planning, the number of set-up orientations are minimized while process sequence for the features are generated. We propose a process planning algorithm based on the topological sort and breadth-first search of graphs. The algorithm is verified using sample products.

Key words : Feature modeling, Feature recognition, Process planning, Topological sort, Breadth-first search

1. 서 론

CAD와 CAM의 통합을 통하여 CIM 시스템을 구축하려는 노력이 최근 매우 활발히 추진되고 있다. 이 통합의 핵심적인 가교 역할을 하는 것이 자동 공정 계획이며 이는 CAD 데이터로부터 직접 공정계획을 수립하는 것을 말한다. 이때 공정계획의 근간이 되는 것은 특징형상(feature)으로 이는 설계된 제품을 가공할 때 사용되는 공정과 직접적으로 관련된다. 특징형상에 대한 정보는 기존의 CAD 시스템의 출력에는 없기 때문에 통합을 위하여 이러한 특징형상을 CAD 데이터로부터 자동으로 추출할 수 있는 알고리

즘이 필수적이다.

자동 공정계획에 대한 연구는 '80년대부터 활성화 되어 많은 연구가 이루어 졌으나 특징형상 인식 알고리즘^[5,7,20,23]의 발달이 비교적 느리게 진행되어 원만한 결과를 달성하지 못하였다. 이를 보완하기 위해 '80년대 말부터 특징형상 기반 설계로 전환하려는 노력이 이루어지고 있으나^[1,2,4,8,9,14,15,16,19] 이 또한 만족할 만한 성과를 거두지 못하고 있다. 그 이유는 어느 한 접근방법이 완전한 해를 주기 어렵기 때문으로 이를 복합하여 시스템을 통합하려는 노력이 태동하고 있다^[10,11].

자동 공정계획을 크게 두 가지로 분류하면 변형적(variant) 방법과 창성적(generative) 방법으로 분류할 수 있다. 변형적 방법은 주로 부품의 group technology를 이용한 코드를 통해 기존의 공정계획을 변형시켜 새로운 공정계획에 이용하려는 방법으로 창

¹⁾ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의하여 연구되었음.

*홍익대학교 산업공학과

성적 방법이 아직은 완전하지 못하게 때문에 이용되는 고전적인 방법이라 할 수 있다. 공정계획의 완전 자동화에서 지향하는 방향은 CAD 데이터로부터 바로 공정계획을 추출하는 창성적 방법이다. 이를 해결하기 위하여는 특징형상 인식 및 특징형상 기반 설계 접근방법이 모두 필요하다. 그러나, 본 논문에서는 특징형상 인식에 의한 접근방법을 우선 해결하는데 초점을 맞추려 한다.

국제적으로 특징형상 인식에 대한 연구는 매우 활발하며 이를 공정계획과 연결하려는 노력은 전 세계적으로 매우 중요한 문제로 인식되어 꾸준히 연구되고 있다. 그러나, 이에 의해 정형화된 상품이 널리 배포되고 있지는 못하다. 즉, 아직은 이 분야가 실험실 단계에 머물러 있다고 볼 수 있다. 그러나, 가까운 장래에 상품화될 전망이므로 이에 대한 대처가 시급한 실정이다.

특징형상의 자동추출 알고리즘은 그 동안 많은 연구가 이루어 졌으나 일반적인 해를 제공하는 알고리즘은 아직 출현하지 않았다. 그 중에서 가장 연구가 활발한 분야가 2½ 차원 특징형상의 자동 추출이다. 2½차원의 특징형상이란 이차원의 도형을 직선운동으로 이동시킬 때 이 도형이 지나는 삼차원 공간으로 구성된 특징형상을 말한다. 이의 대표적인 예가 그림 1에 주어져 있으며 이와 같이 하나의 형상으로 이루어진 특징형상을 단순 특징형상이라 하고 이러한 단순 특징형상이 2개 이상 합쳐진 것을 복합 특징형상이라 한다. 많은 제조 관련 특징형상이 이 부류에 속하기 때문에 이에 대한 연구가 활발하다.

본 논문에서는 2½ 차원의 특징형상이 공정계획을 고려하여 추출되었다고 가정할 때^[2] 이를 이용하여 공정계획을 수행한다. 다만 여기서의 공정계획에는

셋업 수의 최소화와 이에 따른 공정순서의 자동 생성이 포함된다^[3,6,12]. 이를 위하여는 우선 특징형상들 간의 간섭이 공정계획에 지대한 영향을 미치므로 특징형상들 간의 간섭이 공정계획에 어떠한 영향을 미치는가를 분석하고 이를 토대로 공정계획을 수행하는 알고리즘을 제시한다.

제품을 구성하는 모든 특징형상이 단순 특징형상이라면 공정계획 수립은 비교적 단순한 문제로 귀착된다. 그러나, 일반적으로 제품을 구성하는 특상형상은 여러 개의 단순 특징형상들이 서로 교차하여 복합 특징형상을 형성하는 경우가 대부분이다. 이 경우 복합 특징형상을 구성하는 단순 특징형상들 간에는 공정순서를 어떻게 결정하느냐에 따라 가공 결과가 크게 달라 질 수 있기 때문에 복합 특징형상에 대한 심도 있는 연구가 필요하다.

그러므로, 본 논문에서는 복합 특징형상의 종류에 대한 종합적인 검토를 통해 공정계획에서 필요한 여러 제약조건을 도출하여 이를 공정계획에 반영함으로써 보다 현실성 있는 공정계획을 수립하는 알고리즘을 제시한다. 우선 2절에서는 복합특징형상을 공정계획과 연관지어 분류하고 이를 이용한 공정계획 수립 알고리즘을 3절에서 제시하며 4절에서 결론을 맺는다.

2. 복합 특징형상

공정계획에서 인식된 특징형상을 이용할 때 특징형상들 간의 간섭이 없는 경우는 비교적 문제해결이 간단하고 기존의 연구는 이에 초점이 맞추어져 있었으며 간섭을 고려하더라도 부분적인 해결에 그치고 있다^[13,17,18,21,22,25]. 본 논문에서는 이러한 문제점을 인

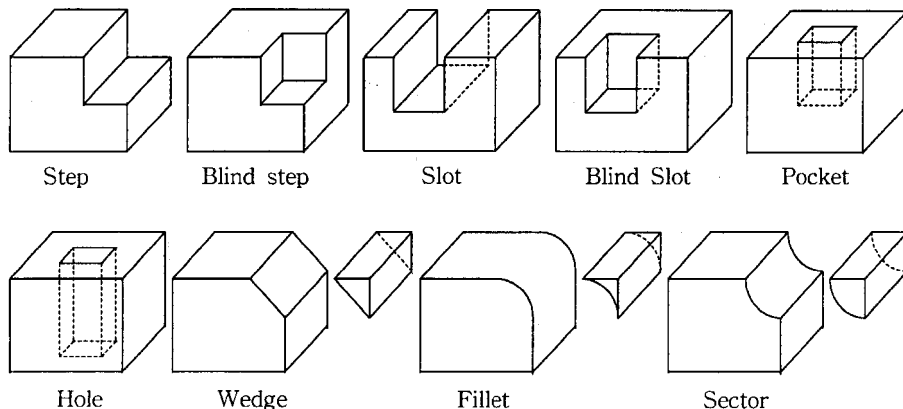


Fig. 1. Examples of simple features.

식하고 특징형상 간의 간섭에 의해 발생하는 복합 특징형상의 종류를 종합적으로 검토하여 이를 체계적으로 분류하며 이를 공정계획에 반영하는 방안을 제시하고자 한다.

이와 같은 분류 방법은 그 동안의 여러 문헌에서 부분적으로 다루던 내용을 종합하여 시도하는 방법으로 가장 바람직한 방법이라고는 할 수 없으나 현장에서 발생하는 문제를 부분적으로 해결하는데 도움을 줄 수 있다. 즉, 완전한 해법을 제시하지는 못하나 부분적인 해를 제시함으로써 추후 연구에 출발점을 제공할 수 있다. 본 논문에서는 가능한 여러 경우를 포괄하여 체계적인 분류를 시도하나 응용분야나 현장 상황에 따라 빠지는 경우가 있을 수 있다.

복합 특징형상을 분류하는 기준은 특징형상들 간의 간섭이 추후 공정계획에 어떠한 영향을 미치는가에 따라 결정한다. 즉, 특징형상들 간의 간섭이 발생하면, 공정계획시 셋업이나 가공순서에 영향을 미치므로 이 영향을 보다 명확히 공정계획에서 반영하기 위하여 간섭의 종류별로 구체적인 영향과 이의 해결방안을 제시하고자 한다.

우선 그 동안 여러 연구에서 복합 특징형상의 간섭을 다룰 때 거론한 유형들을 통합하여 가공시 발생할 수 있는 문제를 고려하여 종합적으로 분류하면 다음과 같은 세 가지 대분류로 나눌 수 있다. 분류의 기본 원칙은 특징형상간의 간섭에 의해 다수의 특징형상간의 공정순서에 선후관계가 발생하는 것을 기준으로 하되 그 원인을 제공하는 이유별로 나누어 분류하였다.

- 압력에 의한 변형이 가능한 특징형상의 상호작용
- 참조면을 고려해야 할 특징형상의 상호작용
- 포함 또는 교차관계를 가지는 특징형상의 상호작용

분류가 이루어지면 이를 이용하여 복합 특징형상에 포함되는 단순 특징형상들간의 가공순서에 대한 제약조건을 생성하여 공정계획시 이용할 수 있도록 한다. 이들 각각의 분류 기준과 이의 세부분류를 차례로 보면 다음과 같다.

2.1 압력에 의한 변형이 가능한 특징형상의 상호작용

가공 중 원자재에 가공 공구에 의한 절삭력이 가해져서 자재가 변형된 경우를 말한다. 즉, 공정 순서의 선후관계가 발생하는 원인이 공구에 가해지는 압력 또는 공구의 절삭력에 의한 경우이다. 이 경우는 다음과 같이 공구의 절삭력에 의하여 변형이 발생하는 경우와 공구에 미끄럼 압력이 가해짐으로 인해

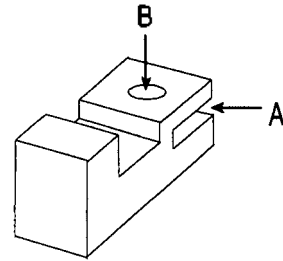


Fig. 2. Raw material distortion due to the machining force of a tool.

공구의 변형으로 정확한 작업이 곤란한 경우로 나누어진다. 이때 발생하는 문제는 공정순서의 선후관계를 제약함으로써 제거할 수 있다. 이에 속하는 경우를 자세히 분류하면 다음과 같다.

- 공구의 절삭력에 의해 원자재가 변형되는 경우
- 원자재의 인장강도가 약해서 분리된 특징형상의 가공이 영향을 받는 경우
- 형상의 기울어진 면으로 인해 공구의 변형이 발생하는 경우

• 가공 중 경계 부분의 정확한 마무리가 곤란한 경우

2.1.1 공구의 절삭력에 의해 원자재가 변형되는 경우

이 경우는 복합 특징형상에서 하나의 단순 특징형상을 가공한 후 셋업을 변경하여 다른 특징형상을 가공하는 경우이다. 이때 원자재의 변형이 발생하여 가공 오차가 지나치게 커질 수 있는 문제가 발생한다. 한 예로 Fig. 2에서 특징형상 A(through slot)와 특징형상 B(through hole)로 구성된 복합 특징형상의 경우 특징형상 A를 먼저 가공하고 특징형상 B를 가공하면 공구의 절삭력에 의해 가해지는 압력으로 얇은 원자재가 휘어 특징형상 B를 제대로 가공하기가 어렵다. 그러므로, 이 경우는 특징형상 B를 blind hole로 인식하여 먼저 가공한 후 특징형상 A를 가공하면 문제가 해결될 수 있다. 즉, 공정순서에 A→B의 선후관계가 성립한다.

2.1.2 원자재의 인장강도가 약해서 분리된 특징형상의 가공이 영향을 받는 경우

이 경우는 형상 관점에서는 분리된 특징형상들 간의 간섭이 발생하는 경우이다. 예를 들어 Fig. 3에서 처럼 A, B 및 C의 3 종류의 특징형상이 존재하는 경우 특징형상 B(V-slot)는 복합 특징형상 A와 C보다 나중에 가공되어야만 원자재의 낮은 인장강도로 인해 발생할 수 있는 원자재의 휘 현상이나 파손을 피할 수 있다. 즉, 이 경우는 A→B와 C→B의 선후관계가 성립한다. 여기서 특징형상 B가 매우 깊이 파

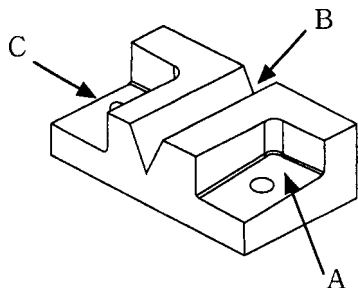


Fig. 3. When tensile strength of the law material is weak.

여 특징형상 A나 C의 가공시 발생하는 절삭력에 의해 원자재가 두 개로 분리될 수 있는 경우로 가정한다. Fig. 3에서 특징형상 A와 C는 이들 복합 특징형상에 포함되는 모든 단순 특징형상들을 지칭한다.

2.1.3 형상의 기울어진 면으로 인해 공구의 변형이 발생하는 경우

이 경우는 제품의 형상에 기울어진 면을 포함하는 특징형상이 존재하는 경우 이를 먼저 가공한 후 기울어진 면과 교차하는 특징형상을 가공하면 공구의 휨 현상으로 가공의 정확도가 떨어지는 경우를 말한다. 여기서 공구는 항상 원자재 좌표계의 한 축과 평행한 방향으로만 접근할 수 있다는 가정이 전제된다. 예를 들어 Fig. 4에서 특징형상 A(wedge)와 특징형상 B(through hole) 간의 간섭이 일어나는 경우 특징형상 A를 먼저 가공하고 특징형상 B를 가공하면 공구의 휨 현상이 발생할 수 있으므로 이 경우는 공정순서에서 B→A의 선후관계가 성립한다. 즉, 특징형상 B를 먼저 가공하면 공구가 수직방향으로 접근하여도 공구의 휨 현상은 발생하지 않는다.

2.1.4 가공 중 경계 부분의 정확한 마무리가 곤란한 경우

이 경우는 작업 방법에 따라 발생하는 칩(chip)에 의해 가공 정도가 나빠질 수 있는 경우로 공정 순서에 제약을 가함으로써 가공 정도를 높일 수 있다. 예

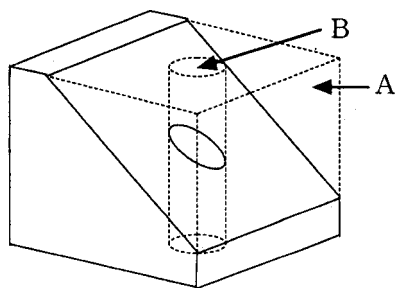


Fig. 4. The machining tool can be tilted.

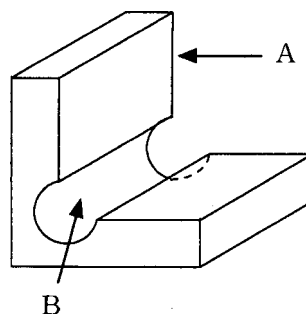


Fig. 5. When finishing is difficult.

를 들어 Fig. 5의 특징형상 A(through step)와 특징형상 B(through hole) 간의 간섭이 일어나는 경우 특징형상 A를 가공한 후 특징형상 B를 가공하면 드릴링(drilling) 공구에 의해 두 특징형상의 경계 모서리 부분의 불필요한 칩이 부착되거나 마무리 상태가 불량하게 될 수 있다. 여기서 특징형상 B는 특징형상 A의 fillet 부분이 아니고 이보다 안쪽으로 파여진 through hole이라 가정한다. 그러므로, 이 경우에는 공정순서에서 B → A의 선후관계가 성립한다. 즉, 특징형상 B를 먼저 가공하면 밀링(milling) 작업에 의해 경계 모서리에 발생하는 칩이 적절히 제거될 수 있으므로 마무리가 우수하게 된다.

2.2 참조면을 고려해야 할 특징형상의 상호작용

원자재의 특징형상을 가공할 때, 주변의 면을 참조하여 치수나 공차와 같은 수리적인 정보를 정확히 측정하게 된다. 그런데 특징형상의 참조면이 해당 특징형상의 작업 이전에 변형되거나 제거된다면 해당 특징형상을 작업함에 있어서 참조 정보를 가질 수 없으므로 곤란한 경우가 생기게 된다. 그러므로, 이러한 문제가 발생하지 않도록 참조면에 따라 공정의 선후관계를 주어야 하는 경우가 발생한다. 이 경우를 특징형상간의 간섭의 종류에 따라 나누어 보면 다음과 같다.

- 참조면의 변형 이전에 관련된 특징형상의 가공이 필요한 경우
- 분리된 특징형상이 동일한 면을 참조면으로 사용하는 경우

2.2.1 참조면의 변형 이전에 관련된 특징형상의 가공이 필요한 경우

이 경우는 특징형상을 가공하기 위하여 필요한 고정구(fixture 또는 vise)를 장착할 참조면의 변형이 발생함으로써 참조시 문제가 될 수 있는 경우이다. 이 경우 고정구 장착을 위한 참조면의 가공을 가장 뒤

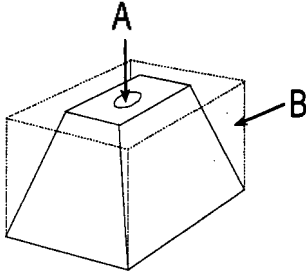


Fig. 6. Feature interaction through the reference face.

로 지정함으로써 문제를 해결할 수 있다. 예를 들어 Fig. 6에서 특징형상 A(through hole)와 복합 특징형상 B 간의 간섭이 일어나는 경우 특징형상 A의 가공에 필요한 참조면이 특징형상 B에 속해있으므로 특징형상 A를 특징형상 B보다 먼저 가공해야 한다. 즉, 이 경우에는 공정순서에서 A→B의 선후관계가 주어져야지 A를 가공할 때 고정구의 장착이 어려워지는 문제를 해결할 수 있다.

2.2.2 분리된 특징형상이 동일한 면을 참조면으로 사용하는 경우

이 경우는 분리되어 있는 두 면이 동일 평면상에 놓이는 경우로 두 면을 합하여 하나의 특징형상으로 가공함으로써 작업량을 증가시키지 않으면서 작업의 편의성을 도모할 수 있는 경우이다. 예를 들어 Fig. 7에서 특징형상 A(blind step)의 우측면이 특징형상 C(wedge)의 우측면과 동일 평면상에 놓여 있다고 가정하면 특징형상 A와 C를 합하여 하나의 특징형상 A'(blind slot)로 가공하여야 보다 효율적이며 이를 적절히 수행하기 위하여는 특징형상 B(through slot)보다 특징형상 A'가 먼저 가공되어야 한다. 만일 특징형상 B를 먼저 가공하면 공구의 이동경로가 복잡해져 작업이 비효율적으로 수행된다. 그러므로, 이 경우에는 공정순서에서 A'→B의 선후관계가 성립한다.

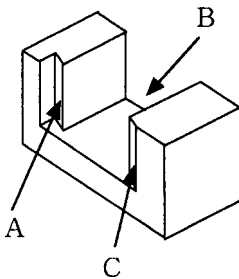


Fig. 7. Separated simple features having the same reference face.

2.3 포함 또는 교차 관계를 가지는 특징형상의 상호작용

특징형상이 다른 특징형상에 포함(nesting)되어 있는 경우나 두 개의 특징형상이 서로 교차하는 경우는 상호간의 포함 또는 교차관계를 분석하여 필요시 공정 순서의 선후관계를 지정하여야 할 필요가 있다. 이를 다음과 같이 두 가지로 분류하여 각각에 대하여 자세히 분석한다.

- 포함 관계를 가지는 특징형상의 상호작용
- 교차 관계를 가지는 특징형상의 상호작용

2.3.1 포함 관계를 가지는 특징형상의 상호작용

포함 관계는 하나의 특징형상이 다른 특징형상을 포함하는 경우이다. 이 경우 포함되는 특징형상을 가공하기 위한 참조면이 포함하는 특징형상이 가공되어야만 생성되므로 공정 순서의 선후관계가 발생한다. 예를 들어 Fig. 8에서 면 1, 2와 6(동일 평면상에 놓이는 것으로 가정) 및 7로 형성된 특징형상 A(through slot)가 가공되어야만 면 2에서 시작되는 특징형상 C(blind pocket)와 면 3, 4 및 5로 형성된 특징형상 B(through slot)를 가공할 수 있다. 그러므로, 이 경우는 공정순서에서 A→B와 A→C의 선후관계가 성립한다.

2.3.2 교차 관계를 가지는 특징형상의 상호작용

교차 관계는 두 개의 특징형상이 서로 교차하는 경우를 말하는 것으로 공정의 편의성에 의해 선후관계가 형성된다. 다만, 이 경우는 포함관계의 경우처럼 절대적인 선후관계라기보다는 상대적으로 작업의 편의성이 인정되는 경우에 한한 상대적인 선후관계라 할 수 있다. 예를 들어 Fig. 9에서와 같이 편의상 분리한 특징형상 A와 C를 하나의 특징형상 A'(through slot)로 보면 이 것이 특징형상 B(blind pocket)에 의해 분할된 형태를 보여주고 있다. 이 경우 가공상의 문제로 특징형상 A'를 박판의 형태로 가공한 후 특징형상 B를 가공하는 것이 작업의 편의

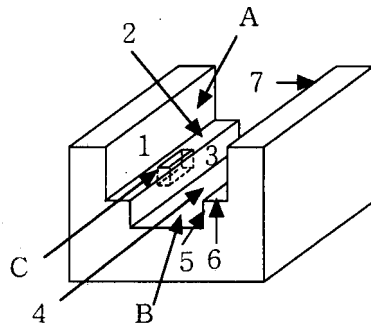


Fig. 8. Nesting relationship among features.

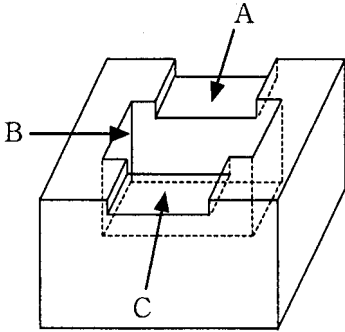


Fig. 9. Intersecting relationship among features.

성을 줄 수 있다. 특징형상 B를 먼저 가공하게 되면 특징형상 A'을 특징형상 A와 C로 분리하여 가공하여야 하기 때문에 공구의 경로가 복잡해져 작업의 비효율성이 발생할 수 있다. 그러므로, 이 경우는 공정 순서에서 A'→B의 선후관계가 성립한다. 이 경우의 상대 선후 관계란 사용하는 공작기계를 어떤 것을 사용하느냐에 따라 달라질 수 있는 경우를 말한다.

3. 공정 계획 수립

복합 특징형상을 구성하는 단순 특징형상들 간의 선후관계와 별도의 단순 특징형상에 대한 정보를 받아 수행해야 할 작업이 셋업수의 최소화와 단일 셋업 상태에서의 공정 순서의 결정이다. 이러한 공정 계획을 수립하기 위하여는 이미 특징형상이 인식되었다고 가정한다. 본 논문에서 사용한 인식 알고리즘은 참고문헌^[24]에 주어져 있다. 특징형상 인식과정에서 포함과 교차관계는 자동으로 인식되어 입력되며 나머지 경우에는 자동공정계획자가 인식된 특징형상을 이용하여 GUI를 통해 선후관계를 입력하는 형식으로 되어 있으며 선후관계는 쌍(pair)으로 이루어졌다고 가정한다.

3개 이상의 복합특징형상의 경우는 여러 개의 쌍으로 나누어 입력하며 쌍간의 사이클이 발생하는 경우에는 추후 제시하는 ordering 과정에서 해를 구하지 못하는 결과가 발생한다. 즉, 해가 없는 경우에 해당하며 이 경우는 인위적으로 적어도 하나의 선후관계를 제거한 후 알고리즘을 적용하여야 해를 구할 수 있다. 사이클이 발생한다는 것은 설계상의 오류가 될 수 있으므로 이 경우는 설계자가 재검토를 통하여 설계를 변경해야 하는 경우이다.

인식된 특징형상과 이의 선후 관계를 이용하여 공정 계획을 수립하기 위하여 필요한 정보는 다음과

같은 내용을 포함한다.

- 단순 특징형상의 경우
 - 특징형상 인덱스
 - 특징형상 종류
 - 모든 공구 접근 가능 방향
- 복합 특징형상의 경우
 - 구성하는 단순 특징형상의 인덱스 및 종류
 - 각 단순 특징형상의 모든 공구 접근 가능 방향
 - 단순 특징형상 간의 가공 선후관계

여기서 특징형상의 종류는 Fig. 1에 제시한 특징형상중 어느 것에 해당하는가를 나타내며 공구 접근 방향은 원자재의 좌표계를 기준으로 할 때 +X, +Y, +Z, -X, -Y, -Z의 6가지 축 방향중 모든 가능한 접근 방향을 나타낸다. 또한, 앞장에서 분류한 복합 특징형상내의 공정 순서의 선후관계에 대한 정보도 포함된다. 위에서 복합 특징형상의 인덱스를 별도로 부여하지 않는 이유는 복합 특징형상을 전체적으로 다루는 경우는 없기 때문에 이를 단순 • 특징형상들로 나누어 취급한다. 각 정보의 표시방법은 다음과 같다.

- 특징형상 인덱스: 인식 순서대로 정수를 부여하여 구별
- 특징형상 종류: Fig. 1에 주어진 단순 특징형상에 정수 인덱스를 부여하여 표시
- 공구 접근 가능 방향: +X, +Y, +Z, -X, -Y, -Z의 6가지 축 방향으로 표시
- 가공 선후관계: 특징형상 인덱스의 쌍으로 표시하며 앞 특징형상을 먼저 가공

이상의 정보 표현을 예를 들어 나타내보기 위해 Fig. 10의 예제 제품을 사용하기로 한다. Fig. 10의 제품의 공정 계획을 위한 입력은 Table 1과 같다. 여기서 특징형상의 종류를 이름으로 표기한 것은 사용자에 따라 단순 특징형상에 대한 정수 인덱스를 임의로 부여할 수 있기 때문에 정수 부여를 생략했다.

이러한 입력을 이용하여 셋업 방향과 가공 순서를 포함하는 공정 계획을 수립하기 위하여는 우선 가공 선후관계를 고려한 정렬이 필요한데 이를 위해 사용

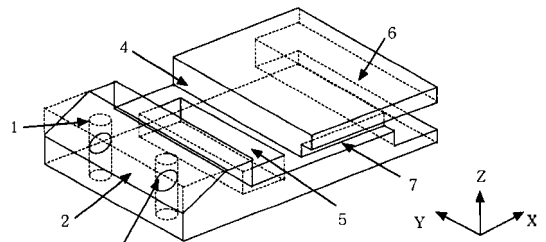


Fig. 10. An example product.

Table 1. Input for the process planning of the example product

특징형상 인덱스	특징형상 종류	공구 접근 가능 방향	가공 선후관계
1	through hole	+Z, -Z	
2	wedge	+Y, -Y	
3	through hole	+Z, -Z	(1, 2), (3, 2)
4	through slot	+Y, -Y, +Z	(4, 5), (4, 7)
5	pocket	+Z	(6, 7)
6	through slot	+X, +Y, -Y	
7	through slot	+X, -Y	

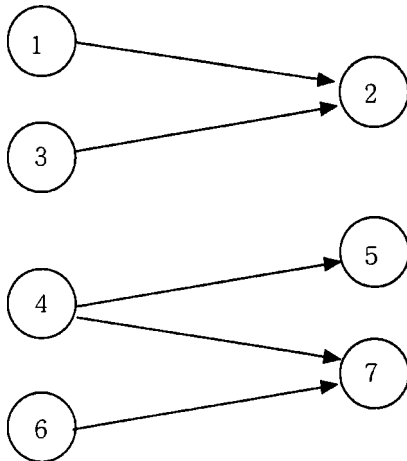


Fig. 11. Result of the topological sorting.

할 수 있는 것이 위상학적 정렬(topological sort) 방법이다. 위상학적 정렬은 partial ordering을 total ordering으로 바꾸는 알고리즘인데 이 논문의 경우는 결과가 항상 total ordering은 아니고 입력의 서로 분리된 partial ordering 그래프가 부분적으로 합쳐져 보다 많은 node를 포함한 partial ordering인 경우가 더 많다. 결론적으로, 본 논문에서 위상학적 정렬은 공정 간의 모든 선후관계(partial ordering)를 고려하여 1차적인 공정 순서(partial ordering의 집합)를 결정해 준다. 예제 제품에 대한 위상학적 정렬의 결과를 그래프로 표시하면 다음 Fig. 11과 같다.

다음은 셋업 수를 최소화하기 위한 작업이 결과 그래프를 이용하여 수행한다. 위상학적 정렬의 결과 그래프를 너비우선(breadth-first) 탐색을 통하여 단일 셋업 상에서 수행할 수 있는 최대한의 공정을 포함하여 그룹핑함으로써 셋업 수를 최소화 할 수 있다. 여기서 단일 셋업이란 단일 공구 접근 방향에 의하여 결정된다. 이 경우 그래프가 단일 그래프가 아니고 분리된 경우에도 전체 그래프를 하나의 연결된 그래프로 간주하여 너비우선 탐색을 수행한

Table 2. Proposed process planning algorithm

단계	수행 내용
1	특징형상 관련 자료 입력
2	가공 선후관계를 위상학적 정렬을 이용하여 그 그래프로 전환
3	그래프의 너비우선 탐색을 통한 공정 계획 수립
3-1	6가지 접근방향에 대한 셋업별 공집합을 설정
	각 집합에 너비우선 탐색을 통해 가공 가능한
3-2	모든 공정 추가
	원소수가 가장 큰 집합을 한 셋업 및 공정 순서
3-3	로 선정하여 출력
3-4	선정된 셋업에 포함된 공정들을 그래프에서 제거
3-5	그래프에 노드가 없으면 종료하고 그렇지 않으면 3-1로 귀환

다. 이에 대한 자세한 과정과 앞에서 거론한 단계를 포함한 공정 계획 알고리즘을 정리하면 Table 2와 같다.

단계 3-1은 단순히 가능한 모든 접근 방향에 대한 집합을 설정하여 각 셋업 하에서 가공이 가능한 공정을 추가할 수 있는 전처리 단계이다. 단계 3-2에서는 현재의 그래프에서 최상위 노드(공정)부터 노드에 연결된 모든 가능 접근 방향을 이용하여 해당 셋업에 공정을 추가해 나간다. 다만 그래프의 다음 레벨로 내려갈 경우는 공정의 선후관계를 고려하여 단일 집합에 선평정이 모두 포함되었을 때에만 고려되고 있는 새로운 공정이 추가될 수 있다. 이는 너비우선 탐색으로 자연스럽게 해결된다. 이 단계가 끝나면 단일 셋업 하에서 수행할 수 있는 가능한 모든 공정이 집합에 추가되므로 이중 원소가 가장 큰 집합을 선택하면 단일 셋업 하에서 가장 많은 공정을 수행할 수 있는 셋업이 선정된다. 이를 단계 3-3에서 출력하여 공정계획에 이용한다. 단계 3-4에서 선정된 공정들을 그래프에서 제외하고 동일한 과정을 모든 공정

Table 3. Results of the algorithm for the example product

Iteration	3-1~3-2	3-3	3-4~3-5
1	+X={6} -X={ } +Y={4, 6} -Y={4, 6} +Z={1, 3, 4, 5} -Z={1, 3}	+Z={1, 3, 4, 5}	② ⑥→⑦ 3-1로 귀환
2	+X={6, 7} -X={ } +Y={2, 6} -Y={2, 6, 7} +Z={ } -Z={ }	-Y={2, 6, 7}	∅ 종료

Table 4. Final process planning results

셋업 순서	셋업(공구 접근 방향)	셋업내 가공 순서
1	+Z	1, 3, 4, 5
2	-Y	2, 6, 7

의 순서가 결정될 때까지 반복하면 공정계획이 완료된다. 이상의 알고리즘을 예제 제품에 적용하여 단계 3의 iteration별 결과를 나타낸 것이 Table 3이다.

알고리즘의 수행단계 3에서 iteration별로 단계 3-3에서 출력되는 결과를 모으면 최종 공정계획이 되므로 예제 제품에 대한 최종 결과는 Table 4와 같다.

제한된 알고리즘은 C++을 이용한 객체 지향적 프로그래밍을 이용하여 구현하였다. 공정계획에 대한 제한된 알고리즘은 heuristic 알고리즘이기 때문에 항상 최적해를 제공하는 것은 아니다. 그러나, 매우 빠른 해를 제시할 수 있기 때문에 공정계획자에게 보다 현실적인 해를 구할 수 있도록 초기해를 제공하는 목적으로 유용하게 사용될 수 있다. 즉, 여기서의 결과는 사용하는 공작기계를 명확히 반영하지 못하였기 때문에 비록 이 단계에서 최적해를 구했다고 하더라도 이 해가 현실적인 최적해는 아닐 가능성이 크다. 그러므로, 여기서 제시하는 해는 공정계획자가 사용 공작기계 등 현실적인 사항을 고려한 최상의 해를 구하기 위한 출발점으로 사용될 수 있는 초기 해로서 유용하다고 할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 공정계획을 셋업과 셋업내의 공정 순서 결정으로 개념화하여 문제를 해결하는 알고리즘을 제시하였다. 이를 위해 사용한 개념이 특징형상이며 특히 복합 특징형상이 공정계획에 미치는 영향을 종합적으로 검토하였다. 다만, 본 논문에서는 특징형상의 개념을 절삭가공에의 이용에 국한하였으나 이러한 분석 틀은 다른 응용 즉, 조립 또는 검사를 위한 응용에도 확장될 수 있다.

일반적인 공정 계획의 개념은 본 논문에서 제시한 내용보다는 포괄적인 의미가 있다. 즉, 셋업과 가공 순서 외에도 기계/공구 선택, 고정구 형상 및 종류, 공구의 전체 움직임을 최소화 등과 같은 다양한 내용을 포함할 수 있으나 본 논문에서는 이러한 복합적인 문제는 추후 연구 과제로 남기고 있다. 또한 제품의 형상에 자유곡면이 포함되는 경우도 추가적인 연구가 필요하다.

참고문헌

- Anderson, D.C. and Chang, T.C., "Geometric Reasoning in Feature-based Design and Process Planning", *Computers & Graphics*, Vol. 14, No. 2, 1990.
- Bidarra, R., de Kraker, K.J. and Bronsvort, W.F., "Representation and Management of Feature Information in a Cellular Model", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 4, pp. 301-314, April 1998.
- Chen, C.L.P. and LeClair S.R., "Integration of Design and Manufacturing: Solving Setup Generation and Feature Sequencing and Feature Sequencing Using an Unsupervised-learning Approach", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 1, pp. 59-75, Jan. 1994.
- Chu, C.C.P. and Gadh R., "Feature-Based Approach for Set-up Minimization of Process Design from Product", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 5, pp. 321-332, 1996.
- Corney, J. and Clark, D.E.R., "A Feature Recognition Algorithm for Multiply Connected Depression and Protrusions", *Proceedings of Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*, Austin, Texas, USA, pp. 171-184, 1991.
- Crawford, R., "Integrating 3D Modeling and Process Planning for Features: A Case Study", *Int. J. of CIM*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 113-118, 1993.
- Dong, J. and Vijayan, S., "Manufacturing Feature Determination and Extraction-Part II: A Heuristic Approach", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 7, pp. 475-484, July 1997.
- Feng, C.-X., Huang, C.-C., Kusiak, A. and Li, P.-G., "Representation of Functions and Features in Detail Design", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 12, pp. 961-972, Dec. 1996.
- Gindy, N.N.Z., Hwang X. and Ratchev, T.M., "Feature-based Component Model for Computer-aided Process Planning Systems", *Int. J. of CIM*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 20-26, 1993.
- Han, J. and Requicha, A.A.G., "Integration of Feature Based Design and Feature Recognition", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 5, pp. 393-404, May 1997.
- Han, J.H. and Requicha, A.A.G., "Modeler-independent Feature Recognition in a Distributed Environment", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 453-464, May 1998.
- Inui, M. and Kimura, F., "Using a Truth-Maintenance System to Assist Product-model Construction for Design and Process Planning", *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 1, pp. 58-70, Jan. 1993.
- Latif, M.N., Boyd, R.D. and Hannam, R.G.,

- "Integrating CAD and Manufacturing Intelligence through Features and Objects", *Int. J. of CIM*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 87-93, 1993.
14. Mill, F.G., Salmon, J.C. and Pedley, A.G., "Representation Problems in Feature-based Approaches to Design and Process Planning", *Int. J. of CIM*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 27-33, 1993.
 15. Perng, D.-B. and Cheng, C.-F., "Resolving Feature Interactions in 3D Part Editing", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 10, pp. 687-700, Oct. 1997.
 16. Ranta, M., Mantyla, M., Umeda, Y. and Tomiyama T., "Integration of Functional and Feature-Based Product Modeling The IMS/GNOSIS Experience", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 5, pp. 371-381, 1996.
 17. Shah, J.J. and Mantyla, M., *Parametric and Feature-based CAD/CAM*, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
 18. Suh, H. and Ahluwalia, R.S., "Feature Modification in Incremental Feature Generation", *Computer-Aided Design*, Vol. 27, pp. 627-635, 1995.
 19. Trika, S.N., Banerjee P. and Kashyap, R.L., "Virtual Reality Interfaces for Feature-based Computer-aided Design Systems", *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 8, pp. 565-574, Aug. 1997.
 20. Tseng, Y.-J. and Joshi, S. B., "Recognizing Multiple Interpretations of Interacting Machining Features", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 9, pp. 667-688, 1994.
 21. Vancza, J. and Markus, A., "Features and the Principle of Locality in Process Planning", *Int. J. of CIM*, Vol. 6, No. 1&2, pp. 126-136, 1993.
 22. Waco, D.L. and Kim, Y.S., "Geometric Reasoning for Machining Features Using Convex Decomposition", *Proceedings of 2nd Symposium on Solid Modeling and Applications*, Montreal, Canada, pp. 53-64, 1993.
 23. Xu, X. and Hinduja, S., "Recognition of Rough Machining Features in 2½D Components", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 7, pp. 503-516, June 1998.
 24. 강범식, 이현찬, "공정계획을 고려한 복합 특징형상의 인식 알고리즘 개발", 대한산업공학회지, 제 22권, 제 3호, 1996. 9.
 25. 김민식, "각주형 파트의 프로세스 플래닝 자동생성을 위한 객체지향 시스템 설계", 홍익대학교 산업공학과 석사학위 논문, 1994.

이 현 찬



1978년 서울대학교 산업공학과 학사
 1980년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1988년 The University of Michigan 산업공학과 박사
 1980년 ~ 1983년 세아제강 기획실
 1988년 ~ 1991년 전자통신연구원 자동설계연구실 실장
 1991년 ~ 현재 홍익대학교 산업공학과 부교수
 관심분야: Shape modeling, Computer Graphics Engineering Database, Information Systems

이 재 현



1996년 경북산업대 산업공학과 학사
 1998년 홍익대학교 산업공학과 석사
 1998년 ~ 현재 홍익대학교 과학기술연구소 연구원
 관심분야: CAD/CAM, Feature modeling
