

단면 재구성을 통한 CSG 모델의 기계가공부품 형상추출

Sliced Profile-based Automatic Extraction of Machined Features from CSG Models

이영래*

Young Rai Lee*

Abstract

This paper describes the development of a systematic method of slicing solid parts based on a data structure called Sliced Profile Data Structure(SPDS). SPDS is an augmented polygon data structure that allows multiple layers of sliced profiles to be connected together. The method consists of five steps: (1) Selection of slicing directions, (2) Determination of slicing levels, (3) Creation of sliced profiles, (4) Connection of sliced profiles, and (5) Refinement. The presented method is aimed at enhancing the applicability of CSG for manufacturing by overcoming the problems of non-uniqueness and global nature. The SPDS-based method of feature extraction is suitable for recognizing broad scope of features with detailed information. The method is also suitable for identifying the global relationships among features and is capable of incorporating the context dependency of feature extraction.

1. 서 론

기계가공 부품의 형상을 CAD 시스템에서 자동으로 추출해내는 것은 CAD와 CAM을 연

결하기 위해 필수적인 기술이다. 기계가공 부품의 형상을 추출하기 위해서는 일반적으로 CAD 시스템에 솔리드 모델이 반드시 존재해야 하는데 이는 솔리드 모델이 최소한 기하

* 단국대학교 산업공학과

학적으로라도 부품에 대한 완전한 정보를 가지고 있기 때문이다. 솔리드 모델이 아닌 여러 개의 2차원 모델(정면도, 평면도, 측면도 등)이나 Wireframe 모델 등으로 부터도 형상을 추출하려는 노력들이 있으나 이는 궁극적으로 모델에 포함된 정보가 완전하지 않기 때문에 추출할 수 있는 형상의 종류에 한계가 있다. 현재 CAD 시스템에서 가장 널리 쓰이는 두 가지의 솔리드 모델로서 B-Rep (Boundary Representation)과 CSG(Constructive Solid Geometry)를 들 수 있는데 본 논문에서는 CSG를 그 대상으로 하고 있다.

그간 B-Rep으로 부터 형상을 추출하는 방법들은 제한적이나마 다양하게 개발되었지만 [1, 2] CSG로 부터의 형상추출은 거의 시도되지 않았다. 현재까지 이에 대한 연구는 세 가지만이 보고되었는데 [3, 4, 5] 세 방법 공히 CSG의 Intersect Operator를 고려하지 않고 있고 인식 가능한 형상의 종류에 있어서나 다루는 CSG 트리가 상당히 제한적이라 실제 응용에는 의문이 있다.

단면을 이용한 주목할만한 연구결과가 Grayer [6]에 의해 발표되었는데, 이 연구에서 Grayer는 2.5차원 부품에 대한 솔리드 모델로 부터 NC코드를 자동으로 생성하기 위해 서로 평행한 일련의 단면을 효과적으로 활용하는 방안을 제시하였다. Grayer는 2.5차원 부품의 솔리드 모델은 단면에 평행한 부품의 면(Face)에서만 그 모양이 바뀐다는 사실에 착안하여 한정된 몇개의 단면들을 한번에 하나씩 NC 밀링기계로 보내 프로필가공(Profile Milling)을 하게하는 매우 의미있는 아이디어를 제안한 바 있다. 하지만 Grayer의 방법은 일련의 단면들 사이에 생길 수 있는 상호연

관성을 무시한채 단순히 정해진 두께의 프로필을 주어진 높이에서 가공하는 방식이기 때문에 필요없는 공구이동이 많아진다는 결점이 있다. 또한 Grayer의 방법은 단면들 사이의 관계분석을 하지 않기 때문에 형상추출에 대한 연구라고 볼 수는 없는데, 예를들면, Hole 가공을 할 때도 이를 Hole로 인식하여 드릴링을 하지 않고 프로필가공으로 처리하고 있는 것 등이다.

형상추출에 있어서 CSG 모델의 문제점은 비유일성(Non-uniqueness)과 전체성(Global Nature)으로 요약된다. 비유일성이란 대부분의 솔리드 모델기법에서의 공통된 문제점인데, 이는 동일한 부품을 한 가지 이상의 CSG 트리로 모델링할 수 있다는 것이다. 전체성이란 부품의 형상을 추출하는데 CSG 트리 어느 일부분의 가지(Branch)만을 보고 결론을 내릴 수는 없다는 것이다. 최악의 경우에 CSG 모델에 있어서 어떤 형상에는 CSG 트리에 있는 모든 Primitive들이 관련될 수도 있기 때문에 CSG 트리를 부분적으로 재구성 해보는 기존의 접근 방법은 기본적으로 CSG의 전체성을 해결할 수가 없게 된다.

이와같은 비유일성과 전체성을 기본부터 해결하기 위해 본 연구에서는 단면을 이용하는 방법을 쓰고 있다. 단면이 상기의 두가지 문제점을 피할 수 있는 이유는 단면에는 적어도 단면이 생성되는 위치에 있는 Primitive들은 모두 단면계산에 포함되며(전체성) 사용된 Primitive들의 조합에 관계없이 단면은 유일하게(유일성) 계산될 수 있다는 점 때문이다.

2. 단면 자료구조

단면은 기본적으로 2차원 Polygon의 집합으로 나타내 지는데 CSG에서는 정규솔리드(Regular Solid)만을 허용하기 때문에 단면에는 정규 Polygon(Regular Polygon)만이 나타나게 된다. 즉, 닫히지 않은 선분(Dangling Edge)이나 따로 떨어진 꼭지점(Dangling Vertex)은 단면에 존재하지 않는다. 따라서 단면을 표현하기 위해서는 기존의 Polygon 자료구조를 사용하면 된다. 다만 기존 Polygon 자료구조에서는 직선 선분만을 다루고 있기 때문에 Hole등을 절단해서 생기는 원호 선분을 표현하기 위해서는 원호선분 자료구조에 시계방향 또는 반시계방향의 방향정보를 추가하고 완전한 원일 경우 가상의 꼭지점(Artificial Vertex)을 0°(EAST) 지점에 추가시켜야 한다.

단면은 CSG 모델을 주어진 높이에서 절단해 얻어지는 2차원 Polygon의 수평적 집합(Horizontal Set)인데 전술한 바 Polygon 자료구조는 이미 이 수평적 집합을 표현하는 장치가 되어있기 때문에 하나의 단면을 나타내는 데는 아무 문제가 없다. 하지만 형상추출을 위해서는 이보다 한걸음 더 나아가 서로 다른 높이에서 생성된 일련의 단면들이 서로 수직적(Vertical)으로 연관되어야 하는데 이렇게 되어야만 형상추출에서 아주 중요한 정보인 형상들간의 선후관계(Precedence Relation)를 구조적인 트리로 표현할 수 있기 때문이다.

Sliced Profile Data Structure(SPDS)는 기본적으로 상기의 수직적 연관을 위해 Polygon 자료구조를 보완한 트리구조로서 여기에 추

가로 형상추출을 위한 제반 정보를 저장할 수 있도록 그림 1.과 같이 구성되어 있다.

아울러 SPDS에서는 형상 이름을 할당해 주기가 애매한 복합형상(Unnamed Feature)들도 수용할 수 있는데, 여기서 한가지 언급할 점은 인식된 형상에 이름을 할당해 주는 것(Naming Features)은 컴퓨터의 입장에서는 그리 중요한 의미를 가지지는 않는다는 것이다. 중요한 것은 인식된 형상을 분석하여 이 형상을 가공하기 위한 기계나 공구를 선택(Operation Selection)한다든지 형상들간의 관계분석을 통해 가공순서를 결정(Operations Sequencing)해주는등의 인식된 형상을 어떻게 활용하느냐로서 이 형상에 어떤 이름을 주는가는 별 문제가 않된다는 것이다. SPDS에는 그림 1.에 설명된 변수들 외에도 응용에 따라 다양한 변수를 추가시킬 수가 있다.

3. 단면 생성 방향의 결정

단면 생성 방향이란 생성될 일련의 단면들에 수직한 방향인데 이 방향이 잘 결정되어야만 형상추출을 위해 적절한 정보를 얻을 수가 있다. 이를 위해 설계에서 통상 쓰이는 Cross Section을 고려해 볼 수 있겠다. Cross Section은 과거에도 몇몇 형상추출 연구에서도 쓰인 바 있다. 하지만 Cross Section은 몇몇 간단한 형상들만으로 범위를 한정하면 유용하지만 본 연구에서 다루는 다양하고 복잡한 형상에 대해서는 적절한 정보가 될 수 없다. 이에 대한 예가 그림 2.에 보여져 있는데 여기서 보듯이 한 Cross Section으로 두가지 전혀 다른 형상을 유추해 낼 가능성이 생긴다.

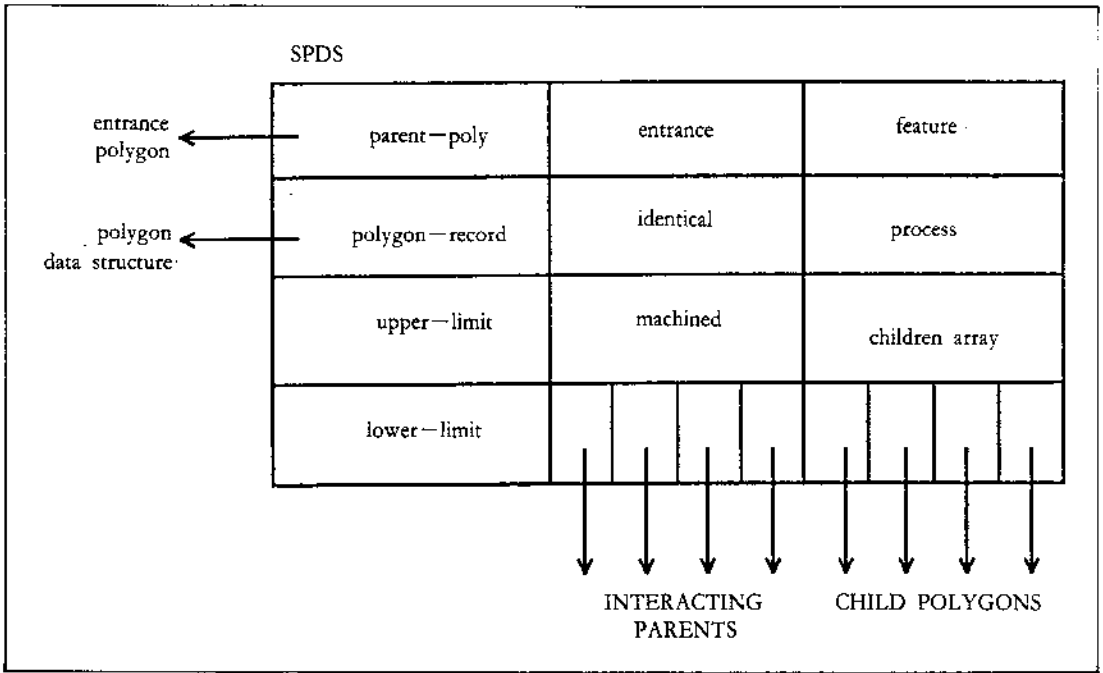


그림 1. SPDS 구성

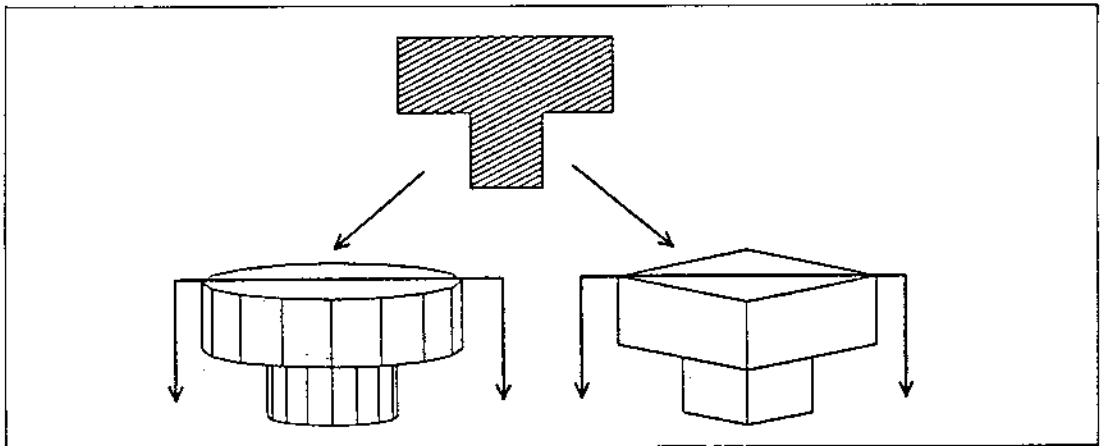


그림 2. 한 Cross Section에 대한 두가지의 형상 유추 가능성

기계가공되는 부품들을 자세히 분석해 본 결과 본 연구에서는 공구의 주 접근방향 (Principal Tool Feed Direction)이 적절한 단면 생성의 방향이라는 결론을 얻을 수 있었

다. 자세한 분석 결과는 [8]을 참조하기 바란다. 이와 같은 공구의 주 접근 방향은 본 논문에서 다루고 있는 육면체 원재료에서 가공되는 직교형 부품의 경우 최대 6개이다. 이

는 통상대로 원재료의 상면 좌측 하단에 정의된 Material Coordinate Frame(MCF)을 기준으로 해서 $\pm X$, $\pm Y$, 및 $\pm Z$ 축 방향이다.

CSG로 부품을 모델링했을 경우 우리가 발견할 수 있는 또하나 중요한 개념은 Primitive들의 방향성(Directionality)인데, 이 방향성은 Primitive들끼리 어떻게 조합이 된다 하더라도 없어지지 않는다. CSG의 경우 형상이라는 것도 결국은 Primitive들의 조합으로 생겨나기 때문에 형상의 방향은 관련된 Primitive들의 모든 방향중에서 하나(또는 그이상)이므로 형상을 가공하기 위한 공구의 주 접근 방향도 결국은 관련된 Primitive들의 방향을 모두 열거하면 그 중에서 하나(또는 그이상)로 결정할 수가 있게 된다. 따라서 단면 생성 방향을 모두 열거하는 반복적 함수(Recursive Function)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

```
function Select_Slicing_Directions(t :
CSG tree; m : xfn matrix)
begin
  if Is_Primitive(t)
  then return m * LCFt /* LCFt : xfn of
t with respect to MCF */
  else /* t is a Boolean Operator node */
  {
    m' = m * LCFt;
    dirl-child = Select_Slicing_Directions
(left_childt, m');
    dirr-child = Select_Slicing_Direc-
tions(right_childt, m');
    return Merge_Directions(dirl-child,
dirr-child);
  };
```

end;

함수 Select_Slicing_Directions()의 초기 파라메타로는 CSG의 Root Node와 World Coordinate System(WCS)을 기준으로한 MCF의 Transformation Matrix이다. 함수 Merge_Directions()는 Child Node 두개로 부터 구해지는 방향들중에서 겹치지 않는 것들만을 모두 합치는 것이다.

4. 단면생성 위치 결정

단면생성 위치란 단면생성 방향에서 단면이 위치할 높이이다. 물론 단면의 수가 많으면 많을수록 많은 정보가 있어서 형상분석이 용이해 지겠지만 이와 비례하여 계산량이 기하급수적으로 증가하기 때문에 단면의 수에는 그 제한이 있을 수 밖에 없다. 또한 Fast Prototyping 등에서 보듯이 일정한 간격을 두고 생성된 단면을 이용할 수도 있겠지만 이를 가지고는 부품의 개략적인 모습만을 알 수있을 뿐이기 때문에 역시 정확한 형상분석에는 적절치 못하다고 하겠다. 단면을 사용하여 부품의 형상을 분석하기 위해서는 필요한 단면의 갯수가 최소로 되도록 단면생성 위치를 적절하게 결정하는 것이 필수적이다.

직교형상만으로 구성된 부품이 CSG로 모델링될 경우에는 다음의 성질들에 의해 단면생성위치를 결정할 수 있다. 이 성질들은 SPDS를 기반으로한 모든 알고리즘의 기본 아이디어로서 정규구간(Regular Region)이라는 개념을 형성시킨다. 정규구간이란 부품의 단면생성 방향을 따라 생성된 단면이 일정하거나 변하더라도 비례적으로 변하는 구간을 말한다.

성질 1. 단면생성 방향을 따라 생성되는 부품의 단면은 Boolean Operator의 종류에 관계없이 Primitive들이 2개 이상 겹치는 구간에서만 변한다.

성질 2. Primitive의 축방향이 주어진 단면 생성 방향과 하나도 일치하지 않으면 그 Primitive는 이 방향에서 가공되는 형상에는 아무 영향을 주지 않는다. 이와 같은 Primitive에 의한 형상은 반드시 다른 방향에서 가공되어 생겨난다.

성질 3. Cone이나 Tapered Extrusion과 같은 Primitive에 의해 생기는 단면은 그 Primitive의 구간내에서 비례적으로 변화된다.

상기 성질들에 의한 정구구간의 예가 그림 3.에 도시되어 있는데 이와 같은 정구구간의 계산은 주어진 단면생성 방향에 평행한 축을 갖는 Primitive들의 구간을 모두 열거한 후 CSG 트리를 거슬러 올라가면서 Boolean Operator에 따라 반복적으로(Recursively) 결합하면 된다. 다음의 함수 Get.Slicing.Levels ()은 Binary 트리에 대한 많은 알고리즘들과 같은 반복적함수(Recursive Function)인데 주어진 단면생성 방향에 대해 단면생성 위치를 Array로 계산해 내는 함수이다.

```
function Get.Slicing.Levels(t : CSG tree;
m : xfn matrix; d : a slicing direction)
begin
{
if Is.Primitive(t) and Is.Orthogonal(t,
m, d)
then return Prim.Level(t, m, d)
else /* t is a Boolean Operator node */
```

```
{
m' = m * LCFt;
levelsl-child = Get.Slicing.Levels
(left.childt, m', d);
levelsr-child = Get.Slicing.Levels
(right.childt, m', d);
return Combine.Levels(OPt, levelsl-child, levelsr-child);
};
end;
```

함수 Get.Slicing.Levels()의 초기 파라메타들은 CSG 트리의 Root Node, WCS에 대한 MCF의 Transformation Matrix와 전술했던 Select.Slicing.Directions()에서 구한 단면생성 방향중 하나이다. 여기에서 함수 Is.Orthogonal()은 Primitive t의 한축이라도 d와 평행하면 TRUE인데 Transformation Matrix m의 좌표를 d와 비교해 보면 쉽게 알 수 있다. 함수 Prim.Level()은 단면생성 방향 d를 따라서 Primitive t의 양쪽 끝(Upper and Lower limits)을 계산하는 함수인데 먼저 Primitive의 모든 축중에서 d와 평행인 축을 알아낸 후 이 축의 양쪽끝 좌표를 CSG 모델에서 알아낸 후 Transformation Matrix를 곱해서 얻어진다.

함수 Combine.Levels()는 Node의 양쪽 Child로 부터 계산되는 구간의 두 Array를 다음의 법칙에 따라 하나의 Array로 통합하는 함수이다.

1. Boolean Operator = UNION일 경우에는 두 Array를 모두 통합한다.

2. Boolean Operator = SUBTRACT일 경우에는 왼쪽 Child Array의 범위를 벗어나는 오른쪽 Child Array의 원소들을 제거한 후 두

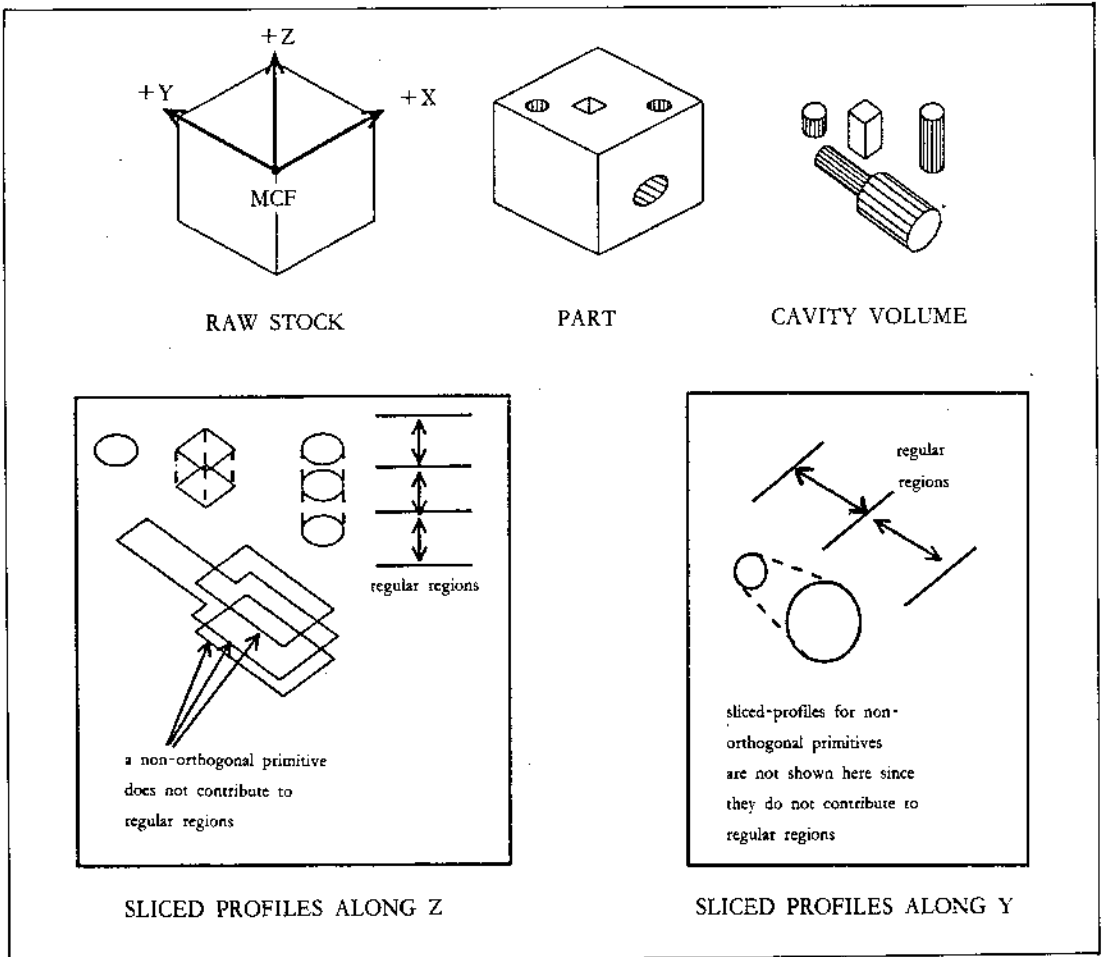


그림 3. 직교형 부품의 정규구간(Regular Region)들

Array를 통합한다.

3. Boolean Operator = INTERSET일 경우에는 두 Array 모두에 대해 다른 Array의 범위를 벗어나는 원소들을 서로 제거한 후 두 Array를 통합한다.

5. 단면 계산

본 논문에서 단면이란 앞 절에서 설명된 것 처럼 단면생성 방향의 한 높이에서 이 방

향과 수직한 평면으로 Cavity Volume을 절단하여 생기는 2차원 Polygon들의 집합이다. 이를 계산하기 위한 일반적인 방법으로 Right-turn rule과 Generate-and-test의 두가지 방법이 있으나 Right-turn rule은 구현시 겹치는 선분의 처리등에 있어서 난점이 있기 때문에 본 연구에서는 Generate-and-test의 방법을 구현하였다.

직선선분만을 갖고 내부에 Hole이 없는 Polygon에 대한 Generate-and-test 방법은 이

미 알려져 있다. 이 방법은 주어진 두 Polygon에 대해서 일단 가능한 모든 선분들을 열거(Generate)한 후 CSG 트리를 거슬러 올라가면서 반복적으로 Boolean Operator에 따라 최종 Polygon에 포함될 선분들만을 취사선택(Test) 하는데 가능한 모든 선분들을 열거할 때 두 선분의 교차지점에서는 선분들을 분할하고 나중에 겹치는 선분들을 제거하게 된다.

본 논문에서는 상기의 Generate-and-test 방법을 보완하여 Polygon안에 복수개의 Hole이 있을 경우와(Hole안에 또 다른 Polygon이 있는 경우도 포함) 원호선분도 다룰 수 있는 방법을 개발하였다. 이와같이 복잡한 Polygon들을 결합할 때 필요한 작업은 주어진 여러 개의 Polygon 리스트로부터 Polygon의 바깥쪽 경계(Outside Boundary)와 이 경계안에 있는 Hole들을 구분하고 서로 연관짓는 것인데 이 작업은 Polygon Containment Matrix를 이용하여 수행한다. Polygon Containment Matrix는 주어진 Polygon 리스트에 있는 가능한 모든 Polygon쌍 사이의 포함관계를 나타내는 Matrix이다.

상기의 절차는 가능한 모든 Polygon쌍에 대해 계산량이 매우 많은 Polygon Containment Test 절차와 Point-in-Polygon Test 절차를 필요로 하는데 Polygon이 원호선분을 포함하기 때문에 구현상 여러가지 특이한 경우가 있다.

6. 단면들간의 연관관계 분석 및 연결

단면들을 연결하는 목적은 형상추출을 위해 Cavity Volume을 공구의 들어올림 없이 연속해서 절삭할 수 있는 요소 Cavity Volume들(즉 요소형상들)로 분리해내는 것이다. 이

와 같이 Cavity Volume을 요소 Cavity Volume으로 분리한 후에야 형상추출 및 형상들간의 선후관계나 Nesting등의 연관관계 분석이 가능해진다. 단면들간의 연결은 기본적으로 공구의 접근 가능성에(Tool Accessibility)대한 검사과정이라 할 수 있는데 본 연구에서 다루었던 Machining Operation들은 Horizontal Milling, Vertical Milling, 드릴링, 보오링, Counter-boring등이다.

한 단면생성 방향에서 Level j 에 있는 단면을 Polygon의 집합 $SP_j = \{P_{1j}, P_{2j}, P_{3j}, \dots, P_{mj}\}$ 라 표시하고 Level $(j-1)$ 에 있는 단면을 $SP_{(j-1)} = \{P_{1(j-1)}, P_{2(j-1)}, P_{3(j-1)}, \dots, P_{n(j-1)}\}$ 이라 하면 $SP_{(j-1)}$ 에 있는 각 Polygon은 SP_j 에 있는 단 하나의 Polygon에 연결되어야 한다. 하지만 이 연결관계는 Many-to-One으로 $SP_{(j-1)}$ 에 있는 한개 이상의 Polygon이 SP_j 에 있는 하나의 Polygon에 연결될 수가 있다.아울러 SP_j 에는 $SP_{(j-1)}$ 에서 연결하지 않는 Polygon이 있을 수도 있으나 $SP_{(j-1)}$ 에 있는 모든 Polygon은 현재 고려중인 방향에서 절삭되기 위해서는 반드시 SP_j 에 있는 Polygon중의 하나에 연결되어야만 한다.

수직적으로 인접한 두 단면을 연결하는 절차는 두 Polygon 사이의 공구접근 가능성에 대한 다음의 성질들에 근거를 두고 있으며 그림 4.에 이에 대한 도시가 되어 있다.

Properties of Tool Accessibility

P_{1j} 로 부터 $P_{k(j-1)}$ 에 공구가 접근하기 위해서는 다음의 조건중 하나가 만족되어야만 한다.

1. P_{1j} 와 $P_{k(j-1)}$ 이 동일하거나;
2. $P_{k(j-1)}$ 이 P_{1j} 안에 포함되거나;
3. P_{1j} 가 $P_{k(j-1)}$ 안에 포함되며 다음 세 조건

중 하나가 만족될 것.

A. $P_{k(j-1)}$ 의 선분들중 적어도 하나가 원재료의 경계면에 있을 것. 이 경우에는 $P_{k(j-1)}$ 이 인접한 단면생성 방향에서 절삭되는 형상과 관계되기 때문에 $P_{k(j-1)}$ 은 본래 Polygon을 버리고 P_{ij} 와 같은 Polygon으로 바뀐다.

B. P_{ij} 와 $P_{k(j-1)}$ 이 동심(Axisymmetric)이고 T-Slot같은 복합형상의 조건을 만족시킬 것. 이 경우 $P_{k(j-1)}$ 은 P_{ij} 에 연결되며 SPDS의 변수 FEATURE에 복합형상의 종류를 기억시킨다.

7. SPDS 조정

단면들의 연관관계를 분석하여 서로 연결이 된 자료구조인 SPDS에는 하나의 형상(보조형상 포함)을 나타내는 동일한 Polygon들이 수직적으로 여러 정규구간에 나타나거나 하나의 형상이 여러 개의 단면생성 방향에서 계산되어 SPDS에 중복되어 나타나는 경우가 있다. 전자의 경우를 정리하는 것을 국지적 조정(Local Refinement)이라 하고 후자의 경우를 정리하는 것을 전체적 조정(Global

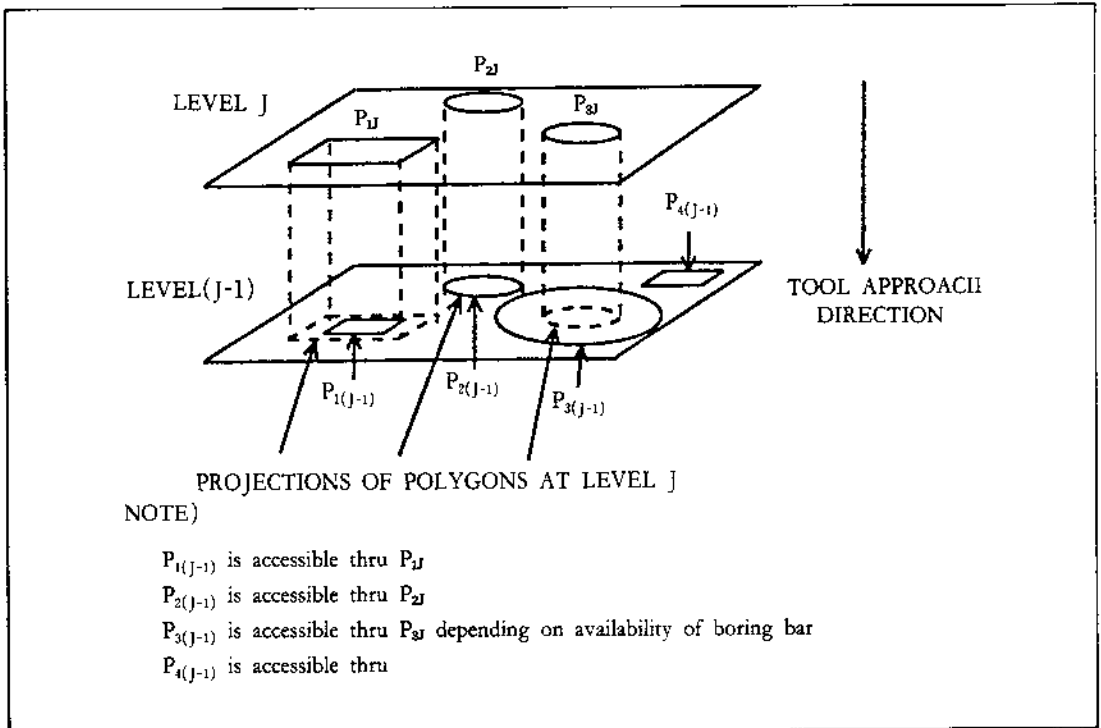


그림 4. Properties of Tool Accessibility

C. P_{ij} 와 $P_{k(j-1)}$ 이 동심원이고 보오링바의 접근이 가능할 것. 이 경우 $P_{k(j-1)}$ 은 P_{ij} 에 연결되며 SPDS의 변수 FEATURE에 Bored-Hole임을 기억시킨다.

Refinement)이라 부른다. 곧 설명되었지만 이와 같이 SPDS에 내포된 중복성은 SPDS의 단점이 아니라 형상분석을 위해 반드시 필요한 정보로서 현장 상황이나 가공관습에 따라 다

른(Context Dependent) 형상의 해석을 가능하게 해준다.

국지적 조정은 각 단면생성 방향에 대해 SPDS가 생성된 직후 수행되며 전체적 조정은 국지적 조정을 거쳐서 모든 SPDS가 생성 완료된 후 수행된다.

7.1 국지적 조정(Local Refinement)

국지적 조정은 그림 5.에 도시된 바와 같이 인접한 정구구간에서의 두 Polygon이 동일하거나 기울기(Slope)가 같을 때 두 Polygon을 하나로 통합하는 과정이다. 이는 정구구간 계산시 Primitive들이 꼭 교차하지 않더라도 단면생성 방향을 따라 Primitive들의 범위가 중첩되면 그 범위들을 세분해서 열거했기 때문에 생기는 현상이다. 이 때 국지적 조정에서는 동일하거나 기울기가 같은 Polygon들을 하나만 남기고 나머지는 모두 폐기한 후 upper_limit와 lower_limit을 적절히 조정하는 작업을 한다.

Counter-sink나 Counter-bore처럼 주형상(이 경우에는 Hole)에 보조형상이 부속되어 있을 경우 원래 SPDS에서는 Parent와 Child가 바뀌어 연결되어 있는데 이를 바로 잡아서 주형상이 Parent가 되고 보조형상이 Child가 되게 조정해준다.

7.2 전체적 조정(Global Refinement)

전체적 조정은 Through-Hole이나 Step, Corner Notch, Chamfer, Fillet등과 같이 원재료의 경계면에 위치한 형상들때문에 필요한 것인데 이들 형상의 경우 두개 이상의 단면생성 방향에서 SPDS가 생성되기 때문이다. Through-Hole의 경우 서로 반대되는 두 방

향에서 SPDS가 하나씩 생성되고 Step의 경우 최대 4개 방향에서 SPDS가 생성되는데 이는 필요없는 중복된 정보들이 아니고 절삭하는 방향에 대한 그 갯수 만큼의 가능성을 제시해서 상황에 따라 가장 적당한 절삭방향과 그에 따른 형상을 추출하도록 해주는 필수적인 정보들이다. 전체적 조정은 이와 같이 한 형상에 대한 여러 개의 SPDS 중에서 가장 적당한 SPDS(Primary SPDS)를 선택하고 나머지들(Secondary SPDS)은 폐기하기 위한 절차라고 할 수 있다.

전체적 조정은 기본적으로 대상 SPDS들에 대해 절삭가공의 효율성을 평가하는 절차인데 평가하는 기준은 상황에 따라 여러가지로 설정될 수 있다. 예를 들어 Through-Hole의 경우 두 방향에서 모두 가공될 수 있지만 형상의 수가 많은 방향에서 가공하는 것이 시간이나(Setup 포함) 정밀도 측면에서 효율적인 경우가 많은데 이 경우의 전체적 조정과정이 그림 6.에 도시되어 있다. 본 연구에서 Primary SPDS를 선정하기 위해 사용했던 기준들은 다음과 같다.

1. Polygon의 갯수가 많은 SPDS (그림 6. 참조)
2. Hole의 갯수가 많은 SPDS
3. Child의 갯수가 많은 SPDS
4. 깊이($| \text{upper_limit} - \text{lower_limit} |$)가 작은 SPDS
5. Bored-Hole을 포함하는 Through-Hole의 경우 Bored-Hole까지의 거리가 짧은 SPDS
6. 기타 Through-Hole의 경우 지름이 큰 Polygon을 갖는 SPDS

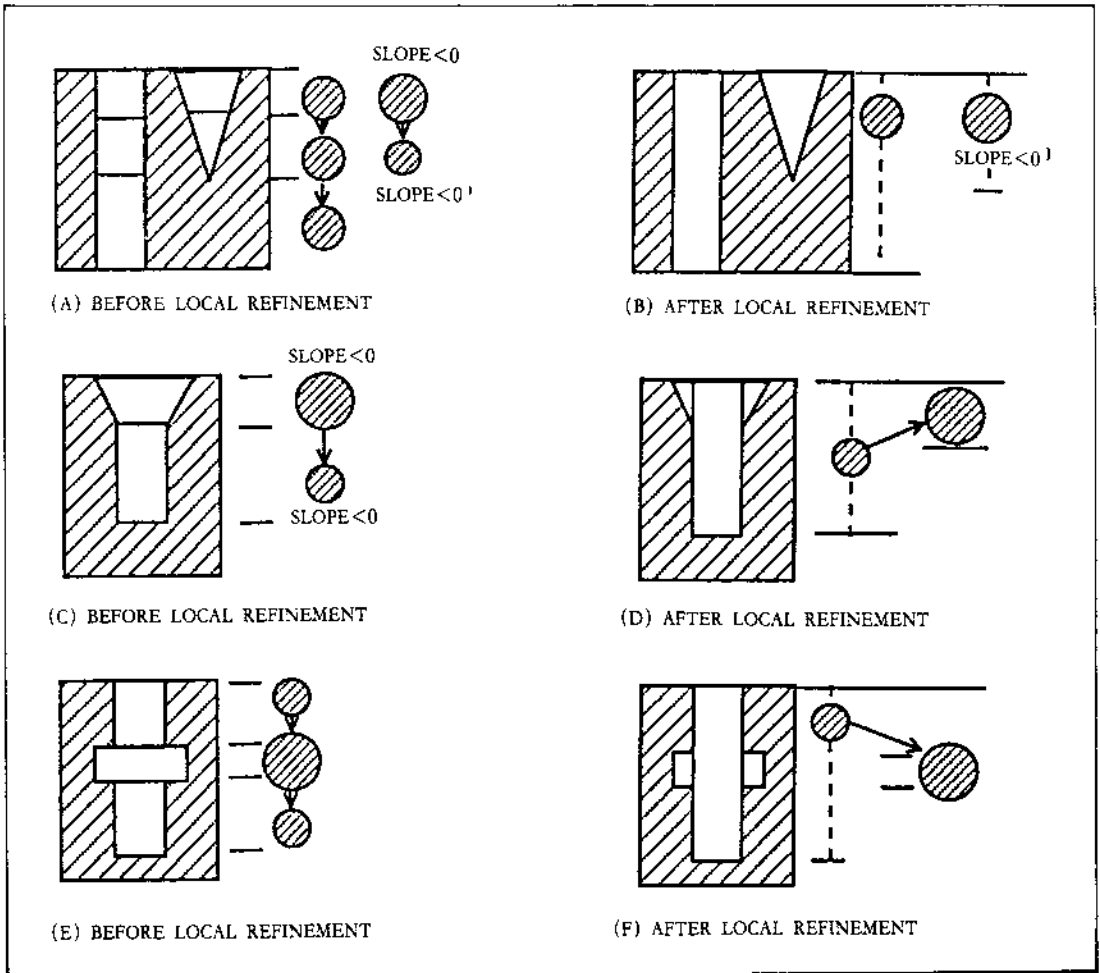


그림 5. 국지적 조정(Local Refinement)의 예

8. 형상 추출 절차

지금까지의 논의에서 SPDS는 형상들을 가공 순서에 따라 트리로 구성해 놓은 것이며 형상추출의 절차는 바로 부품에 대한 SPDS를 계산하고 연결하며 조정하는 과정 그 자체라는 것을 알 수 있다. 일단 부품에 대한 SPDS가 완성되면 이를 가지고 Operation의 선정이나 순서계획(Sequencing)을 하는 것은

SPDS를 분석해 보면 되는데 SPDS는 기본적으로 트리구조를 가지고 있기 때문에 이 분석 절차는 트리에 대한 알고리즘으로 쉽게 구현할 수 있다.

앞에서도 언급했지만 형상에 이름붙이는 작업(Naming Features)은 실제로 큰 의미는 갖지 않지만 필요시 다음과 같은 인식규칙들을 가지고 SPDS를 검사해 보면 되는데 SPDS는 기본적으로 2차원이기 때문에 인식규칙들

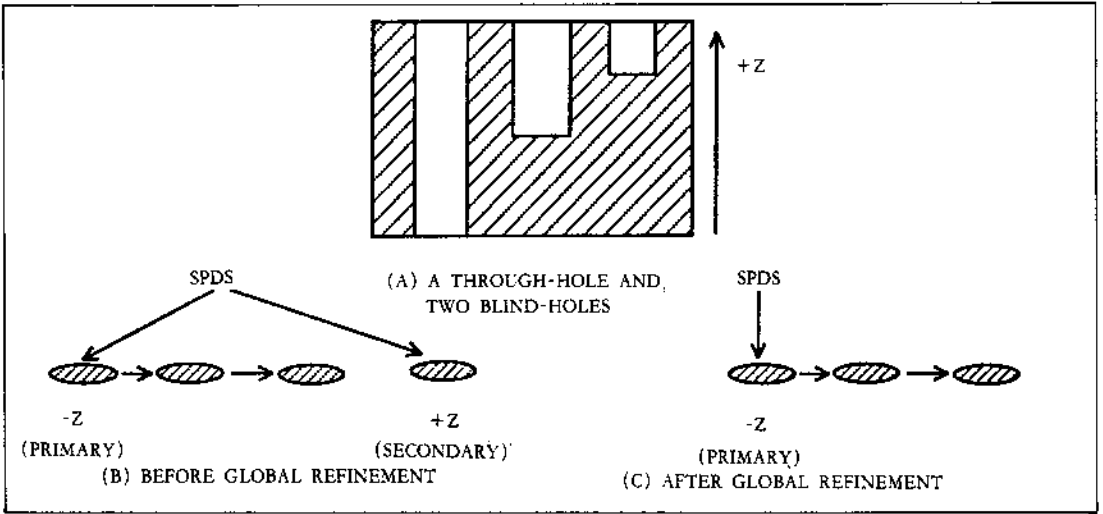


그림 6. Primary SPDS를 선정하는 과정의 예(기준 1.)

을 세우는 것이 그리 어렵지는 않다.

1. SPDS에 있는 원의 기울기(slope)가 0이면 Hole인데 upper_limit와 lower_limit이 원재료의 높이와 일치하면 Through-Hole이고 그렇지 않으면 Blind-Hole이다.

2. Blind-Hole의 Child가 기울기를 갖는 원이면 두개를 합쳐서 Drilled-Hole임을 알 수 있다.

3. SPDS에 있는 사각형 Polygon의 선분들의 BOUNDARY 변수가 [zero, nonzero, zero, nonzero]이면 Through-Slot이고 [nonzero, nonzero, nonzero, zero]이면 Blind-Slot이다.

지금까지 기술된 SPDS에 대한 절차의 프로그램은 C언어를 사용하여 AUTOCAD Release 11의 솔리드 모델링 패키지인 AME (Advanced Modeling Extension)[7]와 Interface하여 작성하였으며 컴퓨터 기종은 DECstation 3100, OS는 ULTRIX이며 MOTIF 윈도우환경하에서 구현하였다. AME와의 Inter-

face를 위해 AUTOCAD에서 제공하는 ADS (Application Development System)와 API (Application Programming Interface)의 Library 함수를 사용하였으며 모든 절차들은 AUTOCAD 작업시 온라인으로 작동되기 때문에 화일을 매개로한 방식보다 시간상으로는 사용 상 많은 잇점이 있다.

본 절차는 교차형상 및 복합형상을 포함한 여러가지의 형상에 대해 시험을 거쳤는데 시험결과에 대한 자세한 사항은 [8]을 참조하기 바란다. 현재까지 구현된 절차들은 비직교형상(Non-orthogonal Features)으로는 구멍만을 대상으로 하였던 바 향후에 보다 많은 비직교형상과 또한 원재료로서 육면체이외의 다양한 모양을 포함할 예정이다. 또한 현재의 절차들은 모든 분석 기준이나 규칙들을 프로그램 내부에 포함시켰기 때문에 상황에 맞게 수정하거나 확장하는데 불편한 점이 있으나 향후 이를 Rule-Base로 분리하여 개선

할 계획이다.

9. 결 론

솔리드 모델로부터 기계가공 부품의 형상을 추출하는 것은 많은 기하학적인 계산과 추론을 필요로 하는 복잡한 문제이며 아직까지도 연구가 미진한 분야이다. 이 문제는 CSG를 사용하였을 경우에 더욱더 어려워지는데 이는 CSG 모델의 두가지 문제점인 비유일성(Non-uniqueness)과 전체성(Global Nature)에 기인한다. 본 논문에서는 단면을 체계적으로 활용하여 이 문제들을 해결하기 위한 방법을 제시하였다.

본 논문에서는 형상추출의 과정이 단순히 형상을 구분(Classification)하여 이름붙이는(Naming) 작업이 아니라 Operation의 선정이나 순서계획(Sequencing)등을 위한 자료구조의 변환과정이라는 주장과 함께 이와 같은 용도에 적합한 자료구조로서 Boolean의 SUBTRACT Operator만을 가지면서 가공과정과 유사한 자료구조인 Destructive Solid Geometry(DSG) 형식의 SPDS 자료구조를 설계하였다.

SPDS를 계산하기 위한 여러가지 성질이나 규칙들은 CSG 모델의 특성과 가공과정을 면밀히 분석하여 도출된 것으로 CSG 모델에 있어서 Primitive와 형상들의 방향성(Directionality)과 정규구간(Regular Region)을 들 수 있으며 이 것들에 의해 단면의 갯수를 한정시킬 수 있다는 것을 보여 주었다. 그 밖에 공구의 접근 가능성(Tool Accessibility)이나 가공용이성(Ease of MACHining)에 대한 분석들도 SPDS 계산과 분석 및 형상추출에 필수적

인 과정이라는 것을 보여주었다.

기존의 방법들에 비해 본 논문에서 제시한 단면을 활용한 형상추출방법의 가장 큰 기여는 원래 CSG 모델에 있는 정보를 SPDS에 그대로 보존시킬 수 있다는 것으로 SPDS 구조의 특성상 형상에 대한 상세정보뿐만 아니라 형상들간의 연관관계를 분석해 낼 수 있고 상황에 따라 다른 형상의 해석(Context Dependency) 까지도 가능하게 한다는 장점이 있다.

본 논문에서 제시한 방법은 교차형상 및 복합형상을 포함한 다양한 형상들에 대해 시험을 거쳤으며 인식할 수 있는 형상의 다양성에서나 추출할 수 있는 정보의 깊이 측면에서 우수하여 CSG가 설계실 차원을 벗어나 가공 현장에까지 응용되는데 큰 역할을 할 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] Henderson, M.R., "Extraction of Feature Information from Three Dimensional CAD Data," Ph.D. Thesis, School of Mechanical Engineering, Purdue University, West Lafayette, Indiana, August 1984.
- [2] Choi, B.K., Barash, M.M., Anderson, D. C., "Automatic Recognition of Machined Surfaces from a 3D Solid Model," *Computer-Aided Design*, Vol. 16, No. 2, March 1984, pp. 81-86.
- [3] Woo, T.C., "Computer Aided Recognition of Volumetric Designs," *Advances in Computer-Aided Manufacturing*, North Holland, Amsterdam, 1977, pp. 121-136.

- [4] Lee, Y.C., Fu, K.S., "Machine Understanding of CSG : Extraction and Unification of Manufacturing Features," *IEEE Computer Graphics and Applications*, January 1987, pp. 20-32.
- [5] Perng, Der-Baau, Chen, Zen, and Li, Rong-Kwei, "Automatic 3D Machining Feature Extraction from 3D CSG Solid Input," *Computer-Aided Design*, Vol. 22, No. 5, June 1990, pp. 285-295.
- [6] Grayer, A.R., "The Automatic Production of Machined Components Starting from a Stored Geometric Description," *PRO-LAMAT Proceedings*, 1976, North Holland Publishing Co., 1976, pp. 137-151.
- [7] Autodesk, Inc., "Advanced Modeling Extension Reference Manual : AOTO-CAD Release II," Autodesk Inc., Publication #AC11AME-02-02, 1991.
- [8] Lee, Y., "Sliced Profile-based Automatic Extraction of Machined Features from CSG Representation," Ph.D. Thesis, Department of Industrial Engineering, North Carolina State University, Raleigh North Carolina, October 1992.