

## 지그재그 포켓 가공에서 공구후퇴 횟수를 줄이기 위한 영역 분할법

서경천\*, 김재정\*\*

### A Partitioning Method Reducing the Number of Tool Retractions in Zigzag Pocket Machining

Suh, K. C.\* and Kim, J. J.\*\*

#### ABSTRACT

In the zigzag milling of a pocket having islands, tool retraction is one of the primary factors that decrease productivity. Therefore, tool path with minimum number of tool retraction has been needed. Most researches about this topic have been concentrated on obtaining the optimum solution formulated through the geometric reasoning of a pocket. Recently, several attempts were made to simplify this problem into region partitioning in order to get the numerically expressed minimum solution. In this research, a method reducing the number of tool retractions extended from existing region partitioning is provided. Applying the segment that is normal to the reference direction of zigzag milling, region partitioning is carried out and structural elements of the region are searched via graphs of islands and characteristic points. Through the processes presented, the number of region partitioned is less than that of existing processes.

**Key words :** Zigzag pocket machining, Tool retractions, Partitioning, I-partition

#### 1. 서 론

포켓 가공 시 가장 많이 사용되는 방식은 크게 두 가지로, contour milling(contour-parallel machining)과 zigzag milling(direction-parallel machining)이 있다. Contour milling은 포켓의 윤곽 곡선의 연속적인 offset 곡선을 공구 경로 구성요소로 사용한다(Fig. 1(a)). 이때, 각각의 offset 곡선은 바로 전 경로의 Voronoi diagram의 계산에 의해 얻어지는 것이 일반적이며, 연쇄적인 Voronoi diagram의 계산에 많은 비용이 소요된다. Zigzag milling은 임의의 가공 기준선에 평행한 직선을 이용하여 공구경로를 생성하는 방식이다(Fig. 1(b)). 따라서, Contour milling 방식에 비해 상대적으로 깨끗한 가공면이 얻어지며 계산도 간단하다.

공구후퇴(Tool retraction)는 가공되고 있는 파삭재의 표면으로부터 공구를 들어올려 절삭이 계속 이루어질

다른 지점으로 이동하는 동작이다. Fig. 1의 점선이 공구후퇴 경로이다. Zigzag 가공인 경우, 공구후퇴는 섬(island)을 포함하는 작업물에서는 반드시 발생한다. 이러한 공구후퇴는 총 가공 경로의 길이를 늘리므로 생산성에 직접적인 영향을 줄 뿐 아니라, 간접적인 손실도 야기할 수 있다.

공구후퇴 횟수가 많아짐에 따라 발생하는 생산성 저하 요소로 우선 추가작업으로 인한 단점을 들 수 있다. Center-cut이 없는 flat-ended tool로 작업을 하는 경우에는 작업평면에 수직인 방향으로의 절삭은 이루어질 수 없으므로, 가공 시작 위치에 드릴을 이용한 구멍 뚫기 작업이 선행되어야 하는데, 이를 위한 시간과 노력은 생산성을 저하시킨다. 또, 일반적으로 공구의 날 끝이나, 공구를 움직이는 모터는 가공이 시작되는 초입에서 가장 큰 충격을 받게 되는데, 공구후퇴의 횟수가 많아지면 가공시작점도 많아지므로, 총 충격량도 커지게 되어 공구의 수명에 직접적인 영향을 준다. 따라서, 공구후퇴 횟수를 줄이는 것은 생산성 향상에 많은 기여를 할 수 있다.

본 연구의 대상이 되는 지그재그 포켓 가공의 효율

\*학생회원, 한양대 기계설계학과  
\*\*정회원, 한양대 기계설계학과  
- 논문투고일: 2000. 08. 10  
- 심사완료일: 2001. 06. 07

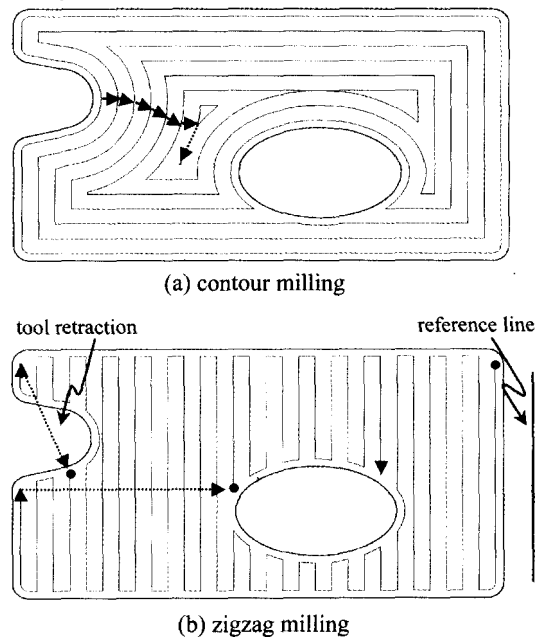


Fig. 1. Two main types of tool-path strategies.

성이나 생산성을 판단하는 기준은 경우에 따라 달라질 수 있다. 즉, 어떤 작업에 적용하는 지에 따라, 최종 가공면의 상태, 총 공구 경로의 길이, 공구후퇴 횟수 및 공구후퇴 길이 등이 판단의 주요 요인이 된다. 본 연구에서는 이 중에서 공구후퇴 횟수를 줄이는 것에만 관심을 두었다.

본 연구에서는 공구후퇴 횟수를 줄여서 생산성을 높이는 데 그 목적을 둔다. 이를 위해, 기존의 영역분할을 통한 공구후퇴 횟수 최소화 방법을 도입한 후 그 단점을 보완하고, 영역 분할을 위해 사용된 기준선에 평행한 선분의 각도를 조정하여 수직이 되게 함으로써, 영역의 수를 더욱 줄일 수 있음을 보여주었다.

## 2. 배경

### 2.1 기존연구

zigzag 포켓 가공을 위한 효율적인 공구 경로에 대한 요구로 인해, 이에 관한 연구는 지속적으로 수행되었고, 관심을 가질만한 여러 가지 성과가 있었다<sup>1)~5)</sup>. 특히, 그 중에서도 Held는 매우 주목 할만 한 결과<sup>6)7)</sup>를 보여주었다. 그는 Concave포켓을 포함한 일반적인 포켓에서 공구후퇴 횟수와 포켓 형상의 연관성을 바탕으로, 주어진 형상 내에서 공구후퇴의 횟수가 최소가 되게 하는 기준선의 방향을 결정하는 방법을 제안하였

다. 또한 주어진 기준선에 대해 최적값에 가깝게 공구후퇴를 줄일 수 있는 방법을 제안하였다.

Arkin<sup>8)9)</sup>은 포켓의 형상과 기준선의 방향이 정해졌을 때, 기준선에 평행한 직선들과 포켓 경계의 교점을 절점으로 표시하고, 그 교점을 양 끝점으로 하는 직선과 포켓 경계들을 간선으로 표현하는 'machining graph'를 생성하고, 간선의 중복 사용 없이 가능한 모든 절점을 지나는 경로를 만드는 알고리즘을 제안하였다. 이 방법은 공구후퇴 횟수가 비교적 적은 공구경로를 만드는 한 방안이 될 수는 있으나, 이 역시 항상 최적값을 제공하지는 않는다.

Kai Tang<sup>10)</sup>은 전체 가공 영역을 여러 개의 부영역(sub-region)으로 나누는 방법으로, 공구후퇴 횟수를 줄이는 문제를 분할된 영역 개수의 최소화 문제로 정형화하였다. 작업평면에서 공구를 들어올리지 않고 한번에 가공이 가능한 영역을 하나의 부영역으로 하고 각 부영역간에만 공구후퇴가 일어나게 함으로써, 공구후퇴 횟수는 부영역의 개수보다 하나 적은 수가 되며, 영역 분할 문제만으로 공구후퇴 횟수의 최적화가 가능하게 되었다. Kai Tang은 이런 접근 방법에 바탕을 두고, 기준선 방향에 평행한 선분들로 가공 영역을 분할할 때 최소의 개수를 갖게 되는 T-partition을 제안하고 수학적 증명을 통해 최적성을 입증하였다. 또, Held가 제안했던 최적해를 얻을 수 있는 기준선의 방향 선택 방법의 타당성을 수식으로 증명하였다.

### 2.2 T-partition

Kai Tang에 의해 제시된 T-partition<sup>11)</sup>은 임의의 포켓의 가공 영역  $P$ 가 주어졌을 때,  $P$ 의 경계상의 특징점을 이용한 간단한 계산을 통해 공구후퇴 횟수의 최소값을 구한다. 여기서, SRP(scan-reflex point)로 표현되는 특징점은 포켓을 정의하는 형상곡선의 기준선에 대한 내부 극점에 해당한다. 따라서, SRP에서 그린 점선은 기준선의 방향과 일치하게 된다.

SRP는 개념적으로 SLS(scan-line segment)의 정의를 통해 구해진다. SLS는 기준선에 평행하며, 선분 전체가  $P$ 의 내부에 있고, 그 양끝이  $P$ 의 경계 위에 있는 선분이다.  $P$ 의 전 범위에 걸쳐서 SLS를 생성하게 되면, 두 개의 SLS가  $P$ 의 경계 위의 한 점을 공유하는 경우가 발생한다. 이 점이 SRP가 되며, SRP의 개수는 T-partition시 영역 개수와 직접적인 연관을 갖는다(Fig. 2 참조).

T-partition은 한 개의 SRP에서 만나는 두 개의 SLS 중 아래쪽만을 영역 구분선으로 사용한다. Fig. 3은 지금까지 설명한 과정에 의해 T-partition된 가공 영역과

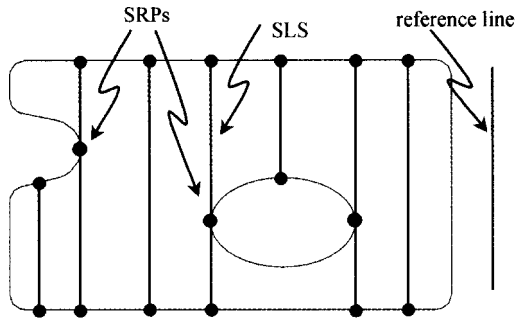


Fig. 2. Basic terminology.

그에 대응되는 공구경로를 보여주고 있는데, 이 때의 영역 분할 개수가 기준선에 평행한 선분을 이용한 경우의 최소값이 된다.

T-partition시 얻어지는 최소 영역의 개수는 포켓의 형상과 밀접한 관계가 있다. 포켓 형상이 주어지면 가공영역에 대해 평면 그래프(planar graph)를 생성할 수 있다. 평면 그래프는 꼭지점과 모서리, 면으로 구성된다. 꼭지점은 SLS의 양 끝점이 되고, 꼭지점을 잇는 SLS나 가공영역의 경계곡선은 모서리로 표현되며, 모서리로 둘러싸인 폐영역은 면으로 간주된다. Fig. 3에서 T-partition된 영역은 Fig. 4의 평면 그래프로 표현할 수 있다.

최소 영역개수는 평면 그래프에 2D Euler formula<sup>[11]</sup>를 적용하고, 기하학적인 해석을 통해 얻어진다.  $F$ 를 면의 개수,  $E$ 를 모서리의 개수,  $V$ 를 꼭지점의 개수라 하면 2D Euler formula는,

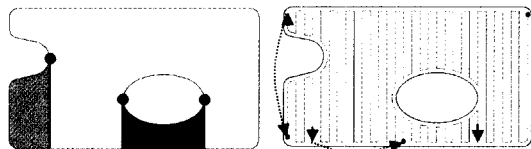


Fig. 3. T-partition and its tool path.

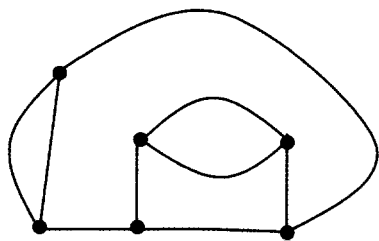


Fig. 4. Planar graph of the T-partitioned region.

$$F = E - V + 1 \tag{1}$$

을 만족한다. 그런데, T-partition을 수행한 후의 기하학적인 특징을 관찰하면,  $n_r$ 가 SRP의 개수라 할 때,

$$E = (3/2)V, \tag{2}$$

$$V = 2n_r, \tag{3}$$

의 관계가 있으며, 식 (2)와 (3)을 이용해서 식 (1)을 전개하면 전체 면의 개수는 SRP의 개수로 표현된다.

$$F = n_r + 1 \tag{4}$$

전체 면의 개수  $F$ 는 섬의 개수  $n_i$ 를 포함하고 있고, 섬에 해당되는 영역은 가공 가능한 영역이 아니다. 따라서, 구하고자 하는 최소 영역의 개수  $n_r$ 는 전체 면의 개수에서 섬의 개수만큼 뺀 것이 된다. 즉,

$$n_r = n_s - n_i + 1 \tag{5}$$

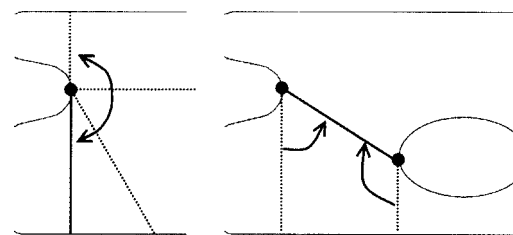
이 된다.

### 3. I-partition

#### 3.1 T-partition의 확장

T-partition에서 SLS의 역할 중 가장 중요한 것은 영역 구분선으로서의 역할이다. 선택된 아래쪽 SLS는 영역 분할시 영역 구분선이 되며 포켓 곡선, 섬곡선, SLS의 조합으로 구성되는 영역들이 생성된다.

영역의 개수에만 관심을 두고, 영역 구분선으로서의 SLS를 살펴보면, Fig. 5(a)처럼 한 개의 SRP를 중심으로 하는 부분적인 가공 영역 내에서 그 SRP를 중심으로 SLS의 각도가 T-partition 상태에서 180도까지 변화하더라도 최소 영역의 개수는 변하지 않고, 항상 2개이다. 또한 두 개의 SRP가 적절하게 배치된 경우에 각각의 SLS를 SRP를 중심으로 적당히 회전시켜 Fig. 5(b)와 같이 두 개의 SLS를 일치시킬 수 있는 경우에는 영역 개수가 감소한다.



(a) Direction change of SLS (b) Unification of two SLSs

Fig. 5. I-partitioning.

본 연구에서는 위와 같은 사실로부터 T-partition의 확장을 시도하였다. 영역 구분선으로 기준선에 평행한 선분만이 아니라 기준선에 대해 기울어진 선분의 사용을 추가적으로 허용하여 적절하게 배치된 SRP를 있는데 사용하였다. 그리하여, 두개의 SLS의 각도를 변화시켜 서로 일치시킨 것과 동일한 효과를 보게 함으로써 영역 개수를 감소시키고자 하였다.

이 때, 기울어진 영역구분선을 따라 가공 시 남는 흔적의 제거를 위해 부분적으로 겹치기 가공이 필요하다. 이를 최소화하기 위해, 기울어진 영역구분선을 그대로 사용하지 않고 기준선에 수직한 선분(NLS: normal line segment)만을 추가로 사용하도록 하였다. 즉, Fig. 6에서와 같이 기준선에 대해 기울어진 선분을 SLS와 NLS의 조합으로 바꾸어 표현하였다. 이 새로운 영역 분할 방법은 I-partition이라 명명하였다.

3.2 NLS생성에 따른 영역 수 감소

Fig. 4와, Fig. 6의 I-partition된 영역을 표현한 Fig. 7의 평면 그래프를 비교해 보면 NLS 생성과정이 한번 있음으로 해서, 위상에 변화가 생겼음을 알 수 있다. 즉, 두 개의 SLS를 일치시키고 그것을 SLS와 NLS 조합으로 이루어진 하나의 영역 구분선으로 표현함으로써 모서리의 수가 하나 감소되고, 꼭지점의 수는 2개 감소한다. 따라서, NLS생성에 따른 위상변화를 수식으로 표현하면, T-partition에서 모서리의 개수와 꼭지점의 개수를 각각  $E_T, V_T$ , I-partition에서 모서리의 개수와 꼭지점의 개수를 각각  $E_I, V_I$ 라 하고,  $n_n$ 을 NLS 생성 횟수라고 할 때,

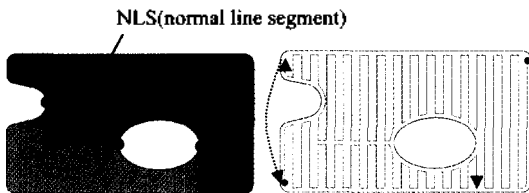


Fig. 6. I-partition and its tool path.

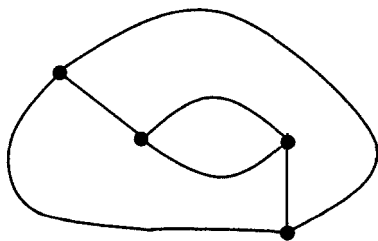


Fig. 7. Planar graph of the I-partitioned region.

$$E_I = E_T - n_n \tag{6}$$

$$V_I = V_T - 2n_n \tag{7}$$

와 같게 된다. 다시, 식 (6)과 (7)을 식 (1)의 2D Euler formula에 대입하고 전체 면의 개수를 구하면, I-partition에서 면의 개수를  $F_I$ 라 할 때,

$$F_I = E_I - V_I + 1 = F_T - n_n \tag{8}$$

이 되고, 식 (8)는 전체 면의 개수가 NLS의 생성 횟수만큼 줄어들게 됨을 보여준다. 이 때, 포켓 형상의 변화로 인한, 섬의 개수의 증감은 없으므로, 영역의 개수는 NLS의 생성 횟수 만큼 감소한다.

$$n_i = n_T - n_n \tag{9}$$

$n_i$  : I-partition시 영역의 개수

4. NLS 생성 알고리즘

I-partition에서 영역 개수의 최소화는 NLS 생성 횟수의 최대화를 통해 얻어진다. 또한, NLS의 생성은 적절한 배치의 두 SRP들 사이에서 일어난다. 즉, 이러한 쌍을 한 개 찾을 수 있으면 NLS를 한 개 생성할 수 있는 것이다. 그런데, 일반적으로 포켓 형상에 포함되는 SRP의 개수는 매우 많아질 수도 있으며, NLS를 생성 할 수 있는 SRP의 쌍들도 여러 개 있을 수 있다. 또한, 한 개의 SRP에 대한 NLS 생성 짝이 다수일 수도 있다. 따라서, NLS 생성 횟수의 증가는 SRP들의 관계를 체계적으로 정리하여 최대한의 NLS생성 짝을 만드는 데 달려있다.

본 연구에서는 NLS 생성시 효율적으로 SRP 쌍을 선택할 수 있는 알고리즘을 개발하여 I-partition에 적용하였다. 이 알고리즘은 임의의 포켓 형상과 기준선의 방향이 주어지면, 모든 SRP들의 상하를 구별하여 그래프 형식의 자료구조로 표현하고, 각 SRP에 레벨을 부여한다. 또한, NLS 생성을 위한 SRP 선택 시에 레벨을 고려하여 최대의 NLS 생성 효과를 얻는다.

4.1 Step 1: 섬들의 분류

Step 1에서는 섬들을 분류하여 그룹화하고, 각 그룹들을 상하관계를 포함하는 그래프로 나타낸다. 그룹화가 필요한 이유는 NLS가 생성 될 수 없는 위치에 있는 섬들을 하나의 그룹으로 묶어서 섬들간에 위치에 따른 레벨을 부여하려 함에 있다. 이렇게 하면, NLS 생성 가능한 SRP 쌍을 찾는 과정에서 같은 그룹내의 SRP는 고려대상에서 제외되므로 불수적으로 탐색시간

도 줄일 수 있다.

섬들을 분류하는 데는 투영법을 사용한다. 두 개의 섬을 기준선에 수직인 직선에 투영시켜서 그림자가 겹치면 동일 그룹으로 정의한다. 이러한 과정을 모든 섬들에 대해 수행하여 그룹화를 진행한다. 동일 그룹내에서 섬들은 위치에 따라 상하를 구분하여 그래프의 절점들로 표현된다. 이 때, 상하를 정하는 방향은 기준선의 양 끝 방향 중 임의로 결정될 수 있으나, 그룹화 과정 중에는 동일한 방향이 적용되어야 한다.

섬들의 그림자 겹침 유무는 각 섬들의 기준선에 수직인 방향으로의 범위를 비교하여 알아낼 수 있다. 기준선의 방향을 y축으로 하는 임의의 2차원 축을 설정하여 각 섬들의 x축 방향으로의 범위를 비교한다. 각 섬들의 범위는 섬을 이루는 지오메트리(geometry) 요소들의 특징점을 조사해서 알아낸다. 특징점에는 각 요소의 끝점과 x축 방향으로의 극대, 극소점이 해당된다. 이 특징점들의 x좌표의 분포로부터 각 섬들의 x축 방향으로의 범위를 결정하였다.

섬들의 상하관계는 광선추적법(ray-tracing)으로 알아낸다. 각 섬의 x축 방향의 최외각 점에서 y축의 양의 방향과 음의 방향으로 광선을 쏘아 양 방향에 대해 처음으로 만나는 섬과 상하관계를 부여한다.

투영법에 의한 상하관계 조사를 수행하여 모든 섬들에 대한 상하 관계가 밝혀지면 그룹화가 종료된다. 그 결과물로 Fig. 8과 같은 섬 그래프들이 얻어진다.

**4.2 Step 2: 그룹별 SRP그래프 분리**

Step 1에서 얻어진 섬 그래프를 이용하면, 섬들 간의 레벨이 결정된다. 하지만, 실제로 NLS의 생성은 SRP와 SRP간의 연결에 의해 이루어지므로 섬 그래프로 표현할 수 없는 경우가 존재한다. 그것은 두개 이상의 SRP를 포함하는 오목한 섬의 경우와, 포켓 경계곡선 상에 SRP를 가지는 경우이다. 이 경우 NLS 생성 가능성이 있는 SRP들을 찾는 과정에서도 제외가 되게 된다. 하지만 특별한 경우의 SRP라 하더라도, 적절한 SRP쌍이 될 가능성은 가지고 있다. 따라서, 섬 그래프

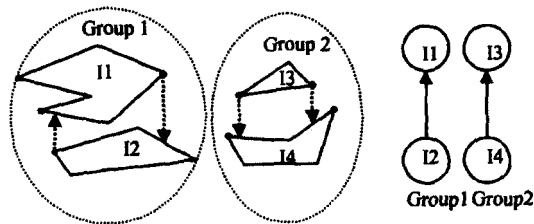


Fig. 8. Island grouping and corresponding graph.

를 SRP 그래프로 나누어야 한다.

섬 그래프를 나누어서 SRP그래프로 표현 할 때, SRP 종류에 따라 2가지의 그래프가 생성된다. SRP는 기준선과 비교하여 좌로 볼록한 좌향 SRP(L-SRP), 우로 볼록한 우향 SRP(R-SRP)로 나눌 수 있다. 이렇게 나누는 이유는 NLS가 각각 한개씩의 R-SRP와 L-SRP 사이에서 생성되기 때문이며, 따라서, 섬 그래프를 R-SRP그래프, L-SRP그래프로 나누는 것은 효율적인 검색을 위해 의미가 있다고 하겠다.

SRP의 탐색은 포켓곡선과 섬곡선을 이루는 요소들의 특징점들을 대상으로 수행된다. 포켓곡선과 섬곡선이 선분과 원호, 자유곡선의 조합으로 이루어진 경우에도 SRP가 될 수 있는 부분은, 기준선의 방향이 y축 방향과 일치할 때, 각 요소의 끝점과 x축 방향으로의 극점들뿐이다. 따라서, 이 특징점들을 대상으로 섬곡선과 포켓곡선의 루프(loop)정보를 구성하면 간단한 외적계산을 통해 SRP를 찾아낼 수 있다. 섬이 시계방향의 루프정보를 가지고 있는 경우, 임의의 특징점을 선택하였을 때 이전 특징점에서 현재의 특징점으로서의 벡터와 현재의 특징점에서 다음 특징점으로서의 벡터를 구성하여 외적이 음(-)이 되면서, 이전 특징점과 다음 특징점의 x좌표값이 현재의 특징점의 x좌표값보다 모두 크거나 작으면 그 점은 SRP이다. L-SRP와 R-SRP의 구분은 전, 후 SRP들과 간단한 좌표비교로 알 수 있다. 현재의 꼭지점의 x좌표 값이 이전과 다음 꼭지점의 x좌표보다 크면 R-SRP, 그 반대이면 L-SRP가 된다.

Fig. 9는 Fig. 8의 첫번째 그룹에 대한 섬 그래프를 2개의 SRP 그래프로 분리한 결과이다. 마찬가지로 방법으로 모든 섬 그래프에 대해 분리작업을 수행하면 NLS 생성을 위한 준비가 끝나게 된다.

**4.3 Step 3: 상호 level을 고려한 NLS 생성**

Step 2에서 모든 SRP에 대한 그래프가 생성이 되었으면 NLS를 생성하게 된다. NLS 생성시 고려할 사항은 가능한 많은 수의 NLS를 생성해야 한다는 것이며, 이를 위해 SRP 그래프에서 동일한 레벨의 SRP 쌍을

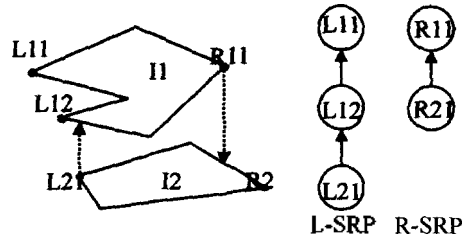


Fig. 9. SRP graphs separated from island graph.

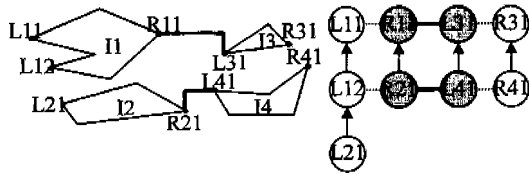


Fig. 10. Selecting appropriate SRP and NLS creation.

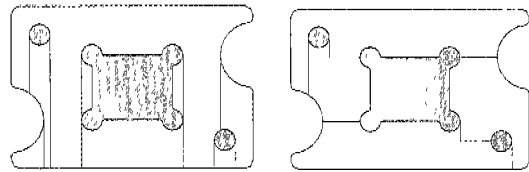


Fig. 11. Example.

찾아서 연결하는 방식을 취하였다.

일괄적인 탐색을 위해 다음과 같은 두 가지 원칙을 따른다. 첫째로 R-SRP를 먼저 선택하고 그에 적합한 L-SRP를 찾는다. 두번째로 NLS의 생성은 그래프 상의 최상위 레벨부터 수행한다. 이 두 원칙은 탐색과 연결 작업의 방향을 정해주는 것으로서 일반적으로, 포켓의 좌측 SRP중 최상위 레벨의 R-SRP가 탐색의 시작점이 된다.

그래프에서 NLS 생성을 위한 SRP 짝을 찾는 과정은 다음과 같다. 일단 시작점이 정해지면 NLS생성 가능성이 있는 모든 L-SRP들, 즉, 같은 그룹에 속하지 않고, 고려 대상인 R-SRP보다 x좌표값이 큰 L-SRP들에 대해 레벨 추적을 하여, 최상위에 있는 L-SRP를 찾아 연결 시켜준다. 다음 시작점은 현재 선택된 L-SRP가 속한 섬의 R-SRP중에서 가장 레벨이 높은 R-SRP가 되며, 적합한 L-SRP를 찾는 과정을 반복하게 된다. 이런 식으로 진행해가면 더 이상 적합한 L-SRP를 찾을 수 없는 경우가 생기는데, 그러면, 아직 짝을 찾지 못한 R-SRP들을 대상으로 새로운 시작점을 결정하고 앞의 과정을 반복하게 된다. 모든 R-SRP에 대해 L-SRP 짝을 찾는 과정을 수행하였으면, NLS를 생성할 수 있는 SRP 쌍들은 모두 찾아낸 것이다.

Fig. 10은 Fig. 8의 예에 대해서, 각 SRP 그래프를 구한 후에, 양 그래프 사이에서 적절한 SRP 쌍을 찾아낸 것을 보여준다.

## 5. 구현 및 적용 사례

본 연구에서 제안된 I-partition의 효율성을 검증하기

위하여 시스템을 구현하였다. 플랫폼으로 IBM RS/6000 43p-140 Workstation을 사용하였으며, 개발 언어는 그래프 형식의 자료구조를 표현하기에 적절한 C 언어, 화면 디스플레이를 위해 GL Library를 사용하였다.

Fig. 11은 실제 사례에 T-partition과 I-partition을 적용하여 분할되는 영역 개수를 비교한 결과로, I-partition의 영역 분할 개수가 T-partition영역 분할 개수보다 적은 것을 보여준다.

## 6. 결론

본 연구에서는 새로운 영역분할법인 I-partition을 개발하였다. I-partition에서는 기준선에 평행한 선분(SLS) 외에 추가로 기준선에 수직인 선분(NLS)을 영역 구분선으로 사용하였는데, 이 경우 T-partition에서 얻을 수 있는 최소영역의 개수보다 NLS 생성 횟수만큼 더 적은 영역 수를 얻을 수 있다. 또한 영역 감소의 열쇠가 되는 NLS 생성 횟수의 최대화를 위한 알고리즘을 개발하여 영역 수 감소효과를 극대화하여 공구후퇴 횟수를 줄일 수 있으며, 이에 따른 생산성 향상 효과가 기대된다.

향후에 연구되어야 할 과제로는, 모든 방향의 기준선 중에서 최적의 영역 분할이 이루어지도록 하는 기준선 방향을 기하학적인 분석을 통해 구할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다. 또한, NLS에 도입으로 인해 불가피한 공구 경로의 꺾임에 따른 절삭시간의 증가를 최소화할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다.

## 참고문헌

1. Bruckner, L. K., Geometric Algorithms for  $2\frac{1}{2}$ D Roughing Process of Sculptured Surfaces. In *Proc. Joint Anglo-Hungarian Seminar on Computer-Aided Geometric Design*, Budapest, Hungary, Oct, 1982.
2. Kramer, T. R., Pocket Milling with Tool Engagement Detection. *J. Manufacturing Systems*, Vol. 11, No. 2, pp. 114-123, 1992.
3. Wang, H. P. et al., On the Efficiency of NC Tool Path Planning for Face Milling Operations. *Trans. Of the ASME, J. of Engineering for Industry*, Vol. 109, No. 4, pp. 370-376, Nov, 1987.
4. Prabhu, P. V., Gramopadhye, A. K. and Wang, H. P., General Mathematical Model to Optimizing NC Tool Path for Faces Milling of Flat Convex Polygonal Surfaces. *Int. J. Production Research*, Vol. 28, No. 1, pp. 101-130, 1990.
5. Deshmukh, A. V., Barash, M. M. and Wang, H. P., On selection of Tool Path Orientations for Generating Pris-

matic Features. Technical Report 93-8, IE Dept., Purdue U., West Lafayette, IN 47907, USA, Mar, 1993.

6. Held, M., A Geometry-Based Investigation of the Tool Path Generation for Zigzag Pocket Machining. *Visual Comput.*, Vol. 7, No. 5-6, pp. 296-308, Sep, 1991.
7. Held, M., *On the Computational Geometry of Pocket Machining*, volume 500 of Lecture Notes in Computer Science. Springer-Verlag, June 1991. ISBN 3-540-54103-9.
8. Arkin, E. M., Fekete, S. P. and Mitchell, J. S. B., The Lawnmower Problem. In *Proc. 5th Canad. Conf. Comput. Geom.*, Waterloo, Ontario, Canada, Aug, 1993.
9. Arkin, E. M., Fekete, S. P. and Mitchell, J. S. B., Optimal Torus for Lawnmowing and Milling. Unpublished manuscript, Nov, 1995.
10. Tang, K. *et al.*, Reducing tool retractions in pocket machining. *Computer Aided Design*, Vol. 30, No. 2, pp. 123-129, 1998.
11. Bollobas, B., *Graph Theory, An Introductory Course*. Springer Verlag, New York, 1979.



**서 경 천**

1998년 한양대학교 기계설계학과 학사  
 2000년 한양대학교 기계설계학과 석사  
 2000년-현재 한양대학교 기계설계학과 박사 과정  
 관심분야: Geometric Modeling, Computational Geometry



**김 재 정**

1981년 한양대학교 정밀기계학과 학사  
 1983년 George Washington 공학석사  
 1983년-1984년 미국 National Food Processors Association 연구원  
 1989년 미국 MIT 공학박사  
 1989년-1991년 미국 IBM T.J. Watson 연구소 연구원  
 1991년-1993년 한국 IBM 소프트웨어 연구소 연구원  
 1993년-현재, 한양대학교 기계공학부 부교수  
 관심분야: Geometric Modeling, CAD/CAM 응용