

등고선가공에서의 기술적 요구사항 들

박상철*

Technological Requirements in Z-level Machining

Sang C. Park

Key Words : Z-level machining, Contour, Tool-path linking, Technological requirements.

Abstract

For the Z-level machining, a tool-path linking procedure is presented. The linking problem is approached from the technological requirements, such as considering the machining constraints among the tool-path-elements, minimizing the tool-path length and reflecting the oneway/zigzag linking option. To simplify the linking problem, we develop a data structure, called a TPE-net, providing information on the machining constraints among the tool-path-elements. By making use of the TPE-net, the tool-path linking problem becomes a touring problem so that every node has been traversed.

1. 서 론

NC 가공 방식은 공구경로 생성 방식에 따라 분류 할 수 있는데, 일부 방식은 평면을 이용하여 가공 대상인 CL-Surface[1]를 잘라서 생성한다. 이러한 방식의 가공에는 대표적으로 두 가지를 들 수 있는데, 지그재그 가공과 (direction-parallel machining) 등고선 가공이 (Z-level machining) 있다. Fig.1 에서 보여주듯이 지그재그 가공은 수직평면으로 CL-surface 를 절단하여 공구경로를 생성하는 반면 등고선 가공은 수평 평면을 사용하여 CL-surface 를 절단한다. 이러한 특성으로 인하여 지그재그 가공은 비교적 평활 한 면을 가공할 때 유리하고 등고선 가공은 벽면이라든지 경사면을 가공할 때 적합하다고 할 수 있다.

등고선 가공은 황삭부터 정삭까지 사용될 수 있으므로 넓은 적용 범위를 가지는 유용한 가공 방식이라 할 수 있다. 등고선 가공을 위한 공구경로 생성은 크게 두 단계로 이루어진다. 우선 CL-surface 를 수평 평면으로 절단하여 등고선 (Contour Curves)들을 얻어내고 얻어진 등고선들

을 공구경로 요소(Tool-Path-Element, TPE)로 삼아 이들을 연결하여 하나의 공구경로(Tool-Path)를 생성하는 것이다. 첫번째 단계인 CL-surface 절단은 [3-5] 상당히 넓은 응용범위를 (RE, RP, CAM) 가지므로 여러 분야에서 사용되고 연구되었다. 그러나 실제 가공 효율에 큰 영향을 미치는 공구경로 연결(Tool-Path Linking)에 관해서는 연구가 수행된바 없다. 등고선 가공을 위한 공구경로 연결 문제는 기술적인 요구사항에서 접근되어야 한다.

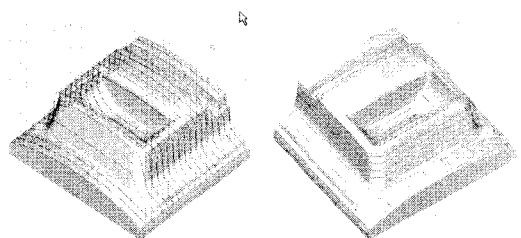


Fig. 1 Direction-parallel & Z-level Machining

본 연구에서는 등고선 가공의 기술적 요구사항 들을 알아보고 이들을 만족 시킬 수 있는 Tool-Path Linking 알고리즘을 제안하고자 한다. 다음 장에서는 등고선 가공에서의 기술적인 요구사항 들을 설명하고 본 논문의 접근 방법을 기술한다. 그리고 3 장에서는 본 논문에서 제안한 알고리즘의

* 정회원, 큐빅테크 기술연구소

E-mail: psc@cubitek.com
Tel: 02-3664-4700

핵심인 **TPE-net** (Tool-Path-Element net)의 구성 방법을 설명한다. 4 장에서는 구현된 알고리즘을 이용하여 생성된 공구경로의 예들을 살펴보고 마지막으로 5 장에서 결론을 맺고자 한다.

2. 접근 방법

우선 등고선 가공의 기술적 요구사항과 본 논문의 접근 방법을 설명하기 전에 독자들의 이해를 돕기 위하여 한가지 매우 간단한 예제를 도입하고자 한다. Fig.2 는 가공대상 곡면 하나와 그 CL-surface 를 절단한 등고선들이 나타나 있다. 5 개의 수평면(Z_1, Z_2, \dots, Z_5)으로 자른 결과 8 개의 등고선(C_1, C_2, \dots, C_8)을 얻은 것이다.

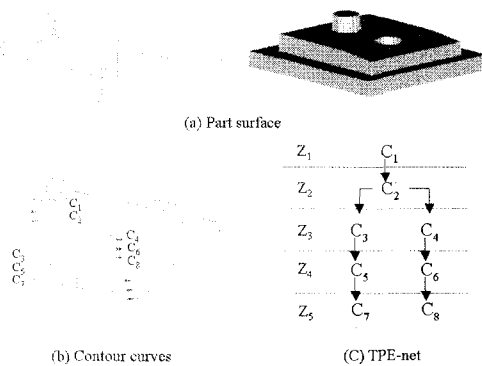


Fig. 2 Example of contour curves

등고선 가공에서 특정 가공 영역이 주어질 수 있는데, 이 때는 얻어진 등고선들을 주어진 가공 영역으로 제한(Trimming)하는 일이 필요하다. Fig.3 은 주어진 가공영역(O1)에 의해서 제한된 등고선들과 이들을 연결한 Tool-Path 를 보여준다.

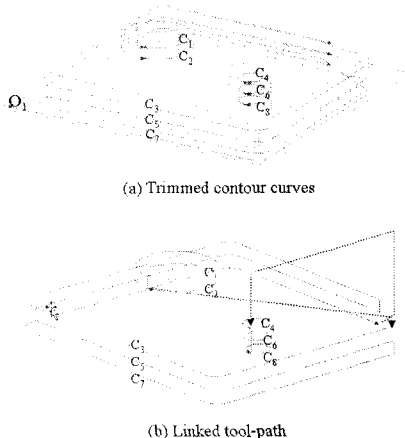


Fig. 3 Trimmed contour curves and a tool-path

2.1 기술적 요구사항 들

일반적으로 등고선 가공에서의 기술적 요구사항은 크게 세가지로 나누어 질 수 있다. “첫번째 기술적 요구사항은 등고선(Tool-Path-Elements, TPE)들 사이의 가공순서를 잘 결정하여 가공 시 공구에 걸리는 가공부하가 일정하게 해야 한다는 것이다.” 만약 서로 다른 수평 평면에 의해 생성된 두 개의 등고선 같은 언덕면에 위치하고 있다면 반드시 높은 쪽이 우선 가공되어야 한다. Fig.4 에는 두 개의 등고선(C_H, C_L)이 나타나 있다. 이때 만약 높은 등고선(C_H)을 먼저 가공하지 않고 낮은 등고선(C_L)을 가공하게 된다면 과도한 부하가 공구에 걸리게 되고 심한 경우에는 공구의 절삭력이 없는 부분(Shank)과 공작물간에 충돌이 생길 수도 있다. 다시 말하면 등고선들 사이에 서로 가공의 선/후행 관계가 존재할 수 있다는 것이다. 예를 들면 Fig2.에서 C_j 는 C_i 의 ‘선행 가공 등고선’이며 C_k 은 C_i 의 ‘후행 가공 등고선’이 되는 것이다.

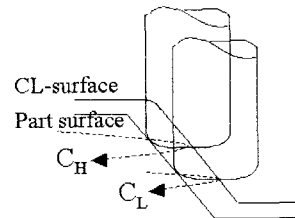


Fig. 4 Machining constraints between contour curves

“두 번째 기술적 요구사항은 등고선들을 연결하여 생성한 공구경로의 전체길이가 최소화 되어야 한다는 것이다.” 이 요구사항은 가공 생산성의 극대화를 위해서는 당연히 해결되어야 할 문제이다. 이미 가공해야 할 등고선들은 결정이 되어 있는 상태에서 전체 공구경로의 길이를 최소화 하는 방법은 이들 등고선들을 연결하는 연결 경로(Linking Path)들의 길이를 최소화 하는 것이다. 직관적으로 볼 때 연결 경로 길이의 최소화를 위해서는 가까이 모여 있는 등고선들끼리 분류하는 것이 필요하다. 예를 들어 Fig.3 은 세 그룹의 등고선($[C_1, C_2]$, $[C_4, C_6, C_8]$, $[C_3, C_5, C_7]$)들로 나눌 수 있다. 이런 식으로 가까이 있는 등고선 그룹을 ‘Sub-Path’라 부르기로 한다. 이러한 접근법에서 결국 Tool-Path 는 Sub-Path 들을 연결함으로써 얻을 수 있다.

“마지막으로 세 번째 linking 알고리즘에 대한 기술적 요구사항은 Oneway/Zigzag 연결 옵션을 지원할 수 있어야 한다는 것이다.” Oneway/Zigzag 의 선택은 가공면의 품질과 가공시간에 대한 선택이라 볼 수 있다. Fig.3 에서 볼 수 있듯이 Zigzag 방

식으로 TPE 들을 연결하면 연결 경로의 길이를 절약 할 수 있으나 공구에 절삭력이 걸리는 방향이 TPE 가 바뀔 때 마다 반대로 되어 절삭 면의 품질이 좋지 않을 수 있다. 일반적으로 산업 현장에서는 스틸(Steel) 가공을 위해서는 Oneway 를 주물(Cast-iron) 가공을 위해서는 Zigzag 를 선택하는 것으로 알려져 있다[1].

이상의 세 가지 기술적 요구사항 들을 만족시키기 위해 본 논문에서는 하나의 데이터 구조를 도입하고자 한다. TPE (공구경로요소)들 사이에 존재하는 선/후행 가공 관계를 나타낼 수 있는 TPE-net 의 사용을 제안한다. TPE-net 의 간단한 예는 Fig.2(c)에 나타나 있다. 노드들은 TPE 들을 나타내고 노드들 사이의 화살표가 가공의 선/후행 제약을 나타낸다. 이러한 TPE-net 의 구성 알고리즘은 다음 장에 설명하도록 한다. 결과적으로 TPE-net 을 이용함으로써 등고선가공의 Tool-path linking 문제는 TPE-net 을 여행(traverse)하여 모든 노드들을 방문하는 문제와 동일하게 된다.

2.2 TPE-net 을 이용한 Tool-Path Linking

본 논문에서 제안된 Tool-path linking 알고리즘은 TPE-net 을 이용하여 다음과 같이 세 단계로 이루어진다. 1) TPE 들을 이용한 TPE-net 생성, 2) TPE 들을 연결하여 Sub-Path 들 생성, 3) Sub-Path 들을 연결하여 Tool-Path 를 생성. 첫 번째 단계의 TPE-net 생성은 다음 장에 자세히 설명될 것이고 본 절에서는 그 이후 단계에 대해서 설명하도록 한다. 즉 여기서는 TPE-net 은 주어진다고 가정한다. 우선 두 번째 단계인 Sub-path 들을 구해내는 알고리즘을 기술하고 추가 설명을 덧붙인다.

■ Linking tool-path-elements for Sub-Paths

//input: TPE-net, Zigzag/Oneway option

//output: SS (Set of Sub-Paths)

Step1) $TPE_c = TPE-net$ 의 ‘연결 가능 TPE’ (연결 되지 않은 선행가공 TPE 가 없는 TPE)중에서 하나를 임의의 선택한다.;

만약 TPE_c 가 NULL 이면 Stop;

$S = \phi$; //Initialize a Sub-Path

Step2) While ($TPE_c \neq NULL$) {

Step2-1) TPE_c 를 S 에 넣고 TPE_c 를 마킹한다;

Step2-2) $TPE_n =$ 만약 TPE_c 가 Open TPE 이면 TPE_c 의 후행 가공 TPE 중 ‘연결 가능’한 Open TPE 중에서 하나를 임의의 선택한다.;

Step2-3) $TPE_n =$ 만약 TPE_c 가 Closed TPE 이면 TPE_c 의 후행 가공 TPE 중 ‘연결가능’한 Closed TPE 중에서 하나를 임의의 선택

한다.;

Step2-4) $TPE_c = TPE_n$;

}

Step 3) S 를 SS 에 넣고 다시 Step1 으로 간다.;

위의 Tool-path-element linking 알고리즘의 효율적인 설명을 위하여 예제를 하나 소개하고자 한다. Fig.5 는 6 개의 수평면(Z_1, Z_2, \dots, Z_6)에 의해서 생성된 15(C_1, C_2, \dots, C_{15})개의 등고선들과 주어진 가공 영역 (아일랜드 포함)을 보여준다. 또한 동일 예제에 대하여 재단된 TPE 들과 TPE-net 이 Fig.6 에 나타나 있다.

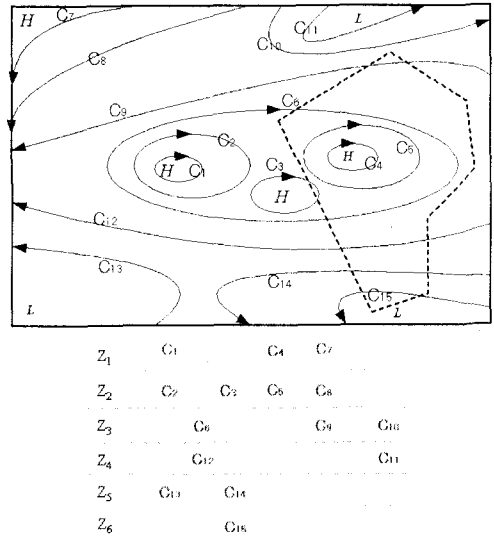


Fig. 5 Example for explaining TPE linking

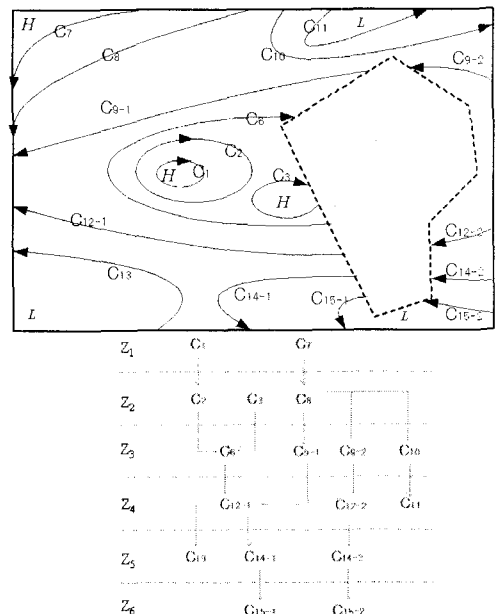


Fig. 6 Tool-path-elements & TPE-net

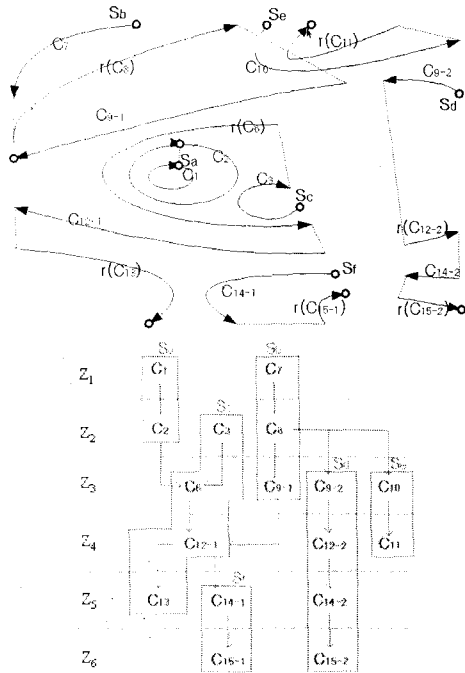


Fig. 7 Sub-Paths by linking tool-path-elements

제안된 TPE linking 알고리즘을 이용하여 Sub-Path 들을 얻을 수 있는데, Fig.6 의 예제를 이용하여 설명하도록 하겠다. (Zigzag option 이라고 가정한다.) 우선 최초 TPE-net 에서는 세 개의 연결가능한 TPE 들(C_1, C_7, C_3)이 있음을 알 수 있다. Step1 에서 C_1 을 TPE_o 로 선택하였다고 하자. 그리고 Step2-1 에서 C_1 을 S 에 넣고 C_1 을 마킹(연결되었다는 표식)한다. 이제 C_1 이 연결되었으므로 C_2 가 연결 가능해지게 된다(C_1 이 C_2 의 선행 TPE). Step2-3 에서 C_2 를 TPE_n 에 넣게 되고 다시 Step 2-1 로 되돌아 가게 된다. 이번엔 C_2 를 마킹하고 Step2-3 에서 TPE_n 을 찾게 되는데 이때 C_2 의 후행 TPE 중에서 연결가능해지는 TPE 가 없으므로 TPE_n 이 NULL 이 되게 된다. Step3 에서는 S (= { C_1, C_3 })를 SS 에 넣고 다시 Step1 로 되돌아 간다. 이번엔 두 개의 연결가능 TPE(C_7, C_3)가 생기는데 C_7 이 TPE_o 로 선택되었다고 하자. C_7 을 Step2-1 에서 연결하고 나면 C_8 이 연결가능 해지게 되고 Step2-2 는 C_8 을 TPE_n 으로 선택한다. 이때 C_7 과 C_8 은 Open TPE 들이며 연결 옵션이 Zigzag 라는 것을 주목하자. (연결 옵션이 Zigzag 라는 이야기는 필요에 따라서는 Open TPE 들의 가공 방향을 반대로 바꿀 수도 있다는 의미이다.) 이때 C_7 의 끝점과 C_8 의 시작점을 그냥 연결 시키는 것 보다는 C_8 의 방향을 반대로 만들어 연결 시키는 편이 연결 경로의 길이를 더 절약 할 수 있다. 즉 C_8 을 reverse 하여

$r(C_8)$ 로 만들어 C_7 에 연결하는 편이 바람직하다는 것이다. 이런 방식으로 진행하면 이번에는 얻어지는 Sub-Path S 는 { $C_7, r(C_8), C_{9-1}$ }가 된다. Fig.7 에는 이렇게 얻어진 6 개의 Sub-Path 들이 나타나 있다.

이제 Tool-Path 생성을 위해 남은 일은 얻어진 Sub-Path 들을 연결 시키는 것이다. 즉 Sub-Path 들을 임의의 순서로 정렬하는 일이라고 할 수 있는데 이때에도 Sub-Path 들 간에 가공 제약 관계를 고려해야 한다. 예를 들면 Fig.7 에서 Sub-Path S_c 가 S_a 에 앞서서 가공될 수는 없다. 왜냐하면 S_c 에 속하는 TPE C_6 의 선행 TPE 인 C_2 가 S_a 에 속하기 때문이다. 그러므로 이러한 관계를 고려하는 동시에 공구 연결 경로를 절약할 수 있게 Sub-Path 들을 정렬하는 것이 중요한데, 본 논문에서는 앞서 설명된 TPE linking 알고리즘에서 생성된 순서대로 Sub-Path 들을 정렬하는 것을 하나의 대안으로 권한다. TPE linking 알고리즘에서 생성된 순서는 이미 가공 제약관계는 고려 되었기 때문에 Feasible 한 대안이라고 볼 수 있고, 여기서 더 최적화 시키는 문제는 Traveling Sales Man 과 같은 문제일 뿐 아니라 설사 최적화 시킨다 하더라도 그 효과는 미미하기 때문이다.

3. TPE-net 생성

본 장에서는 주어진 등고선(TPE)들을 이용하여 TPE-net 을 구성하는 알고리즘을 설명하도록 한다. TPE-net 을 구성하기 위해서는 TPE 들 간의 가공 제약 관계(각 TPE 의 선/후행 가공 TPE 들)를 이끌어 내는 것이 핵심이라고 할 수 있다. 비록 Fig.2 와 같은 간단한 예제에 대해서 TPE 들간의 가공 제약 관계는 직관적으로도 알 수 있으나 복잡한 가공영역이 주어질 수 있는 일반적인 경우(Fig5.) 에도 항상 적용될 수 있는 알고리즘을 개발하는 것은 Trivial 하지 않다.

CL-surface 를 절단하는 하나의 수평면에 대해서 생각해 보자. 하나의 수평면은 해당하는 높이에서 가공영역을 두 가지의 서로 다른 성격의 영역으로 나눈다고 볼 수 있다. Fig.8(c)(d)에서 보여주듯이 하나는 수평면 보다 높은 부분 (Hill Area), 다른 하나는 그 수평면 보다 낮은 부분 (Lake Area). 하나의 수평면 Z_i 에서의 Lake Area 의 함을 $SL(Z_i)$ 라고 하자. 이때 한가지 주목할 것은 수평면의 높이가 높아질수록 Lake Area 도 따라서 넓어진다는 것이다. 즉 Z_i 가 Z_{i-1} 보다 높은 수평면일 때 $SL(Z_{i+1}) \subseteq SL(Z_i)$ 가 항상 성립한다는 것이다. 이제 가공제약을 이끌어 내기위해 가장 중요한 개념인 'Hillside Area'을 정의한다. Hillside Area 는 두 개의

수평면의 Lake Area 들을 이용하여 정의할 수 있다. Fig.8(e)에서 보여 주듯이 Z_1 와 Z_2 사이의 Hillside Area 는 $SL(Z_1)$ 에서 $SL(Z_2)$ 을 뺀으로써 구할 수 있다. 그 결과 Hillside Area HS_1 은 세 개의 TPE(C_1, C_2, C_3)로 정의(바운딩) 될 수 있다. 이때 우리가 기억해야 할 것은 가공 제약 관계는 같은 언덕면에 생기는 TPE 들간에 발생한다는 점이다 (Fig4.). 결과적으로 상대적으로 낮은 수평면 Z_2 에 속하는 C_3 는 C_1 과 C_2 에 의해서 제약 받는다는 것이다 (C_1 과 C_2 는 Z_1 에 속함). 즉 C_1 과 C_2 가 C_3 의 선행 TPE 가 된다.

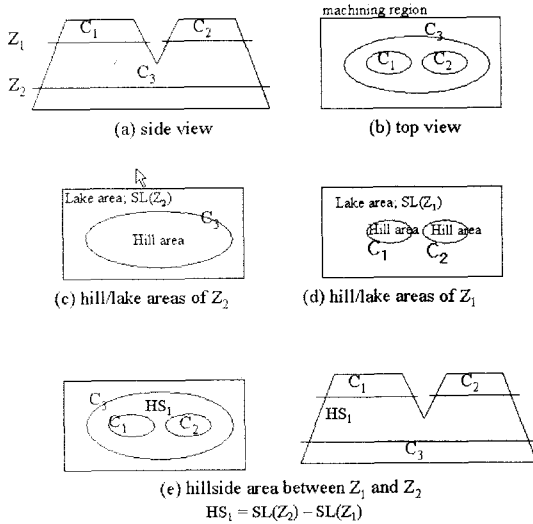
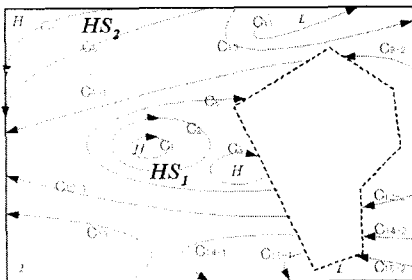


Fig. 8 Hillside area between two slicing planes



Hillside areas between Z_1 and Z_2 (HS_1, HS_2)

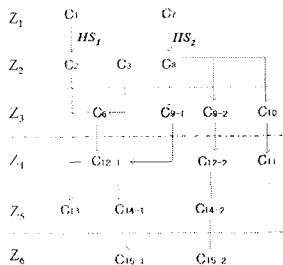


Fig. 9 Example of TPE-net construction

이렇게 정의된 Hillside area 의 개념을 이용하여 TPE 들 사이의 가공제약을 구할 수 있다. 우선 모든 연속된 두개의 수평면 들 사이에서 Hillside 들을 구한다. 그리고 각 Hillside area 에 속하는 TPE 들을 높은 수평면에 속하는 것들과 낮은 수평면에 속하는 것들로 나누어 높은 수평면에 속하는 것들이 낮은 수평면에 속하는 것들을 제약하도록 만들면 되는 것이다. Fig.9 는 이런 식으로 구성되는 TPE-net 의 예를 보여주고 있다.

4. 구현 결과

제안된 Z-Level machining 을 위한 Tool-path linking 알고리즘은 구현 되었으며 다양한 예제에 적용 되었다. Fig.10 은 세 개의 Sub-Path 들로 이루어진 Tool-Path 를 보여준다. Fig.11 과 같은 경우는 가공 영역이 아일랜드를 포함하고 있는 경우에 생성된 Tool-Path 를 보여준다. 실제로는 등고선 가공이 적합하지 않은 평활 한 면을 아일랜드로 지정하여 등고선 가공에서는 제외하는 경우가 많다.

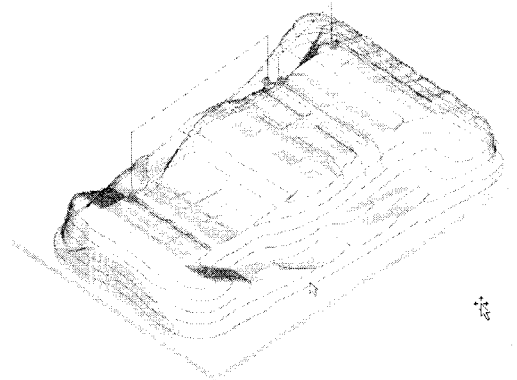
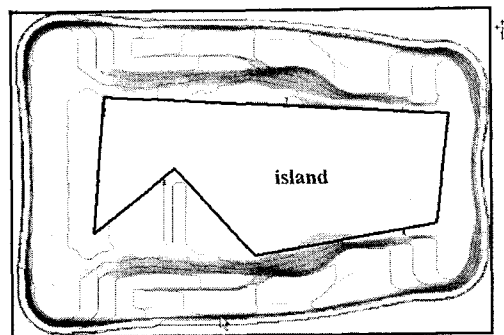
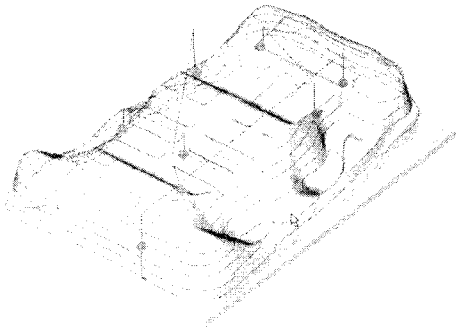


Fig. 10 Example of the Z-Level machining tool-path



(a) Machining region (bold lines)



(b) Generated tool-path

Fig. 11 Tool-path with an island

5. 결론

본 논문은 등고선 가공을 위한 Tool-Path linking 알고리즘을 제안 하였다. Tool-Path linking 은 실제 가공 효율에 큰 영향을 미칠 수 있으므로 가공의 기술적 요구사항 들을 파악하여 그것을 Tool-Path linking 알고리즘에 반영하려고 노력하였다. 본 논문에서 파악하고 고려한 기술적 요구사항은 세 가지가 있는데, 1) TPE 들 사이의 가공 제약을 고려하는 것, 2) Tool-Path 전체 길이를 최소화 하는 것, 그리고 3) Oneway/Zigzag 연결 옵션을 지원하는 것이었다. 이러한 기술적 요구 사항들을 효율적으로 반영하기 위해 본 논문에서는 TPE 들 사이의 가공 제약을 표현하는 TPE-net 을 제안하였다. TPE-net 의 도입은 Tool-Path linking 문제를 TPE-net 의 모든 노드들을 방문하는 문제로 전환함으로써 한층 최적화 하기 수월하게 만들어 준다. 이렇게 제안된 TPE-net 을 이용하여 제안된 Tool-Path linking 알고리즘은 세 단계로 이루어진다. 1) TPE-net 의 생성, 2) Sub-Path 들을 얻기 위해 TPE 들을 Linking, 3) Tool-Path 를 얻기 위해 Sub-Path 들을 Linking. 이상이 세 단계 중에서 특히 TPE-net 을 생성하는 문제는 주어지는 가공 영역이 복잡한 경우에 대처하는 것이 쉽지 않으나, 본 논문에서는 Hillside area 의 개념을 도입하여 일관성 있게 해결하였다.

참고문헌

- (1) Choi BK, Jerard RB., 1998, *Sculptured Surface Machining*. Kluwer.
- (2) Park SC, Choi BK., 2000, "Tool-path planning for direction-parallel area milling", *Computer-Aided Design*, Vol. 32, No.1, pp17-25.

- (3) Lee YS, Chang TC., 1992, "A contour method for intersections of hunting-planes to evaluate machining information", *Journal of Design and Manufacturing*, Vol. 2, pp119-133.
- (4) Choi HT, Kim JA, Lee SH and Paik IH., 1995, "Development of cross-sectional information conversion system from STL file for Stereolithography", *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 12, No.11, pp140-147.
- (5) Xi F, Shu C., 1999, "CAD-based planning for 3-D line laser scanning", *Computer Aided Design*, Vol. 31 No. 7, pp 473-479.