

곡면 경계부 미절삭 체적의 잔삭 가공에 관한 연구

맹희영⁺, 임충혁^{*}

(논문접수일 2009. 12. 30, 심사완료일 2010. 3. 8)

A Study on Machining of Uncut Volume at the Boundary Region of Curved Surfaces

Heeyoung MAENG⁺, Choong-Hyuk YIM^{*}

Abstract

It is presented in this study a new efficient intelligent machining strategy, which can be used to remove the uncut volume at the boundary region of curved surfaces caused by cutter interference. The geometric form definitions and recognition of topological features of the surface triangulation mesh are used to generate cutter paths along successive and interconnected steepest pathways, that minimize the cusp height left after flat end milling.

In order to machine the uncut volume gradually, the z-map cutter centers are adjusted to avoid cutter interference for the 6 kinds of avoidance types. And then, the generative subsequent paths are sequenced to determine the second step cutter paths for the next uncut volume. For the 2 kinds of test models with convex and concave surface region, the implemented software algorithm is evaluated by investigating the residual swelling of uncut volume for each machining step.

Key Words : Steepest Directed Paths(최대경사 방향선), Avoidance of Cutter Interference(공구간섭 회피), Uncut Volume(미절삭 체적), Multi-step Machining(다단계 가공), Flat End Mill(평엔드밀)

1. 서론

일반적으로 곡면 가공 과정은 CAD/CAM을 통해 모델링 하는 과정과 NC 밀링가공 과정, 그리고 남겨진 커스(cusp)을 사상가공으로 다듬질하는 과정을 거친다. 밀링가공 후 표

면 거칠기가 나쁘게 되면 사상가공 시간이 많이 소요될 뿐 아니라 형상 정밀도가 나빠지게 된다. 반대로 밀링가공 후의 표면 거칠기를 좋게 하여 사상가공의 부담을 줄이기 위해서는 매우 긴 절삭경로를 거쳐 오랜 시간동안 가공하여야 한다. 또한 곡면의 밀링가공은 볼엔드밀(ball end mill) 공구를

⁺ 서울산업대학교 공과대학 기계설계자동화공학부 (maeng@snut.ac.kr)

주소: 139-743 서울시 노원구 공릉동 172번지

^{*} 서울산업대학교 공과대학 기계설계자동화공학부

사용하고 있어서 평엔드밀(flat end mill)에 비해 절삭성과 이송속도가 많이 떨어진다.^(1,2)

이와 같은 특성 때문에 곡면의 밀링가공 기술은 크게 다음과 같은 3가지 방향으로 발전하고 있다.

첫째로는 절삭경로를 극소 피치(pitch)로 촘촘히 하면서 스핀들을 수만 rpm으로 회전시켜 고속밀링 가공하는 추세로의 발전 방향이다. 그럼으로써 형상 정밀도를 향상시키고 사상가공 시간과 밀링가공 시간을 단축시키는 효과를 거두고자 하고 있다.^(3,4)

둘째로는 사용 공구를 볼엔드밀 대신에 필렛엔드밀(fillet end mill) 또는 평엔드밀로 대체하여 가공하려는 발전 방향이다. 필렛엔드밀이나 평엔드밀을 사용하게 되면 볼엔드밀 가공으로 남게 되는 커슍(cusp) 크기를 줄여 주어 표면거칠기를 향상시키고 절삭능률도 좋아진다.^(5,6)

셋째로는 곡면의 곡률 특성이나 미절삭 부위를 고려하여 황삭, 중삭, 정삭, 잔삭 등의 가공 단계를 조화롭게 계획하여 가공하려는 발전 방향이다. 밀링 공구의 직경이 크면 중절삭이 가능하여 절삭능률도 좋고 표면거칠기도 향상된다. 그러므로 황삭과 중삭은 가능한 한 직경이 큰 공구를 사용하면 절삭시간을 단축시킬 수 있지만, 공구 직경이 너무 크면 복합곡면 사이의 경계 영역과 같은 부위에서는 미절삭 체적이 과잉으로 많이 남게 되는 단점이 있다.^(7,8)

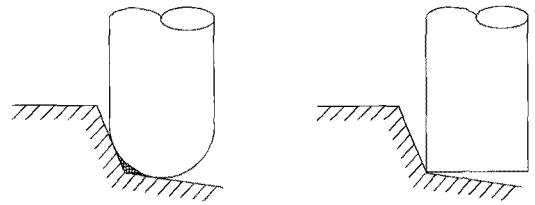
그렇지만 아직까지 미절삭 체적을 가공할 수 있는 절삭 경로의 산출 방법이 개발되어 있지 못하여 이러한 가공상의 특징점을 CAM 시스템의 반영하고 있지 못하고 있다.

따라서 본 연구는 평엔드밀 커터를 사용하여 곡면을 3축 가공할 때, 미절삭 체적의 잔삭가공을 효율적으로 가공하는 방법론을 개발하고자 하였다. 삼각형 요소화 된 곡면모델을 대상으로 최대 경사방향 트리 추적법(steepest directed tree method)⁽⁸⁾을 사용하여 황삭과 중삭가공 후에 남게 되는 미절삭 체적을 삼각형 요소화된 메쉬(mesh)들의 방향성과 토폴로지(topology)를 이용하여 절삭경로를 연속적으로 추적할 수 있는 방법을 고안하였다. 그리고 곡면상의 z-map 모델을 이용하여 공구간섭의 여러 가지 유형들을 추출한 후, 미절삭 체적을 단계적으로 가공할 수 있는 경로의 산출 방법을 고안하였다.

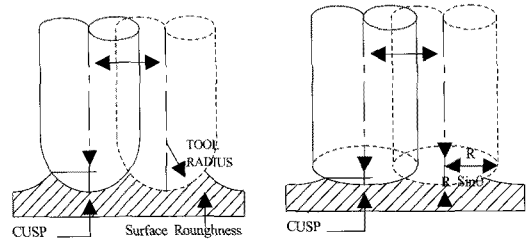
2. 가공경로 결정 알고리즘

2.1 볼엔드밀과 평엔드밀의 가공 특성 비교

볼엔드밀은 Fig. 1(a)에서와 같이 평엔드밀에 비해 복합곡



(a) Uncut volume at a corner



(b) Cusp height of surface

Fig. 1 Comparison of surface integrity between ball end mill(left) and flat end mill(right)

면의 교차부위에서 미절삭 체적을 많이 남기며, Fig. 1(b)와 같이 같은 크기의 평엔드밀에 비해 표면거칠기도 좋지 못하다. 또한 볼엔드밀은 회전 중심에서 문지름(rubbing) 현상이 생겨 절삭속도를 필요한 만큼 증가시키기가 어렵다. 그러나 평엔드밀은 바닥면의 절삭날이 절삭에 참여하지 않는 한 충분한 속도로 소재를 절삭하기에 좋기 때문에, 공구 바닥부가 절삭에 참여하지 않도록 가공경로 방향을 항상 상향(upward) 절삭 형태로 유지하면 매우 바람직한 가공이 된다. 이는 곡면의 최대 경사방향을 따라 상향으로 이동하는 CL(cutter location) 데이터를 산출하여 해결할 수 있으며, 최대 경사방향 트리 추적법⁽⁸⁾을 통해 실현할 수 있다.

2.2 최대경사 방향트리 개념 및 원리

최대 경사방향 트리 추적법은 삼각형 요소화된 메쉬 곡면 상에서 최대 경사방향 트리를 결정하는 알고리즘이다.⁽⁹⁾

곡면 상의 임의의 절점에 대해 이웃의 절점에 대한 최대 경사선은 Fig. 2과 같이 공간 경사도에 의해 결정된 상향 트리(UT; Upward Tree) 에지와 하향 트리(DT; Downward Tree) 에지로 나뉜다. 또한 이들 에지는 방향선에 대한 절점의 위치에 따라서 UT는 UTo와 UTi로 구분되며, DT는 DTo와 DTi로 구분된다.(o는 out, i는 in의 의미) 즉, 절점 A의 관점에서 볼 때 B점 및 C점으로 나가는 에지는 각각

UTo 및 DTo로 표시되나, 절점 B의 관점에서 표시될 때에는 이 에지는 B점을 향해 들어오는 에지이므로 UTi, 그리고 절점 C의 관점에서 표시될 때에는 C점을 향해 들어오므로 DTi로 표시된다.⁽⁷⁾ 여기서 UTi가 존재하지 않는 고립점에 대하여는 이 점에 대한 DTo의 역 방향선을 가상 UTi(virtual UTi : VUTi)로 정의하여 설정한다.

이와 같이 모든 절점에 대하여 UT와 DT가 결정되면 이들 정보를 이용하여 곡면 위의 임의의 절점이 곡면형상의 변화과정에서 어떠한 역할을 차지하고 있는 가를 지정할 수 있다.

2.3 최대경사 방향선 결정

최대경사 방향선을 탐색하는 과정은 삼각형 요소화된 곡면 메쉬에 대하여 각 절점에 대한 상향 및 하향의 최대경사 에지(edge)들을 찾아서 UTo 및 DTo를 저장함으로써 시작된다. 현행점을 중심으로 이웃점(adjacent point)들로 이루어진 삼각패치의 각 점들을 반 시계방향으로 차례로 높이값(H)과 거리(D)를 구하여 높이값/거리 비가 가장 큰 값을 UTo로 취한다. 같은 방법으로 음의 방향의 가장 큰 높이값을 절대값으로 취하여 DTo를 구할 수 있다. 구해진 UTo와 DTo로부터 상대관계를 적용하여 UTi와 DTi를 구한다.

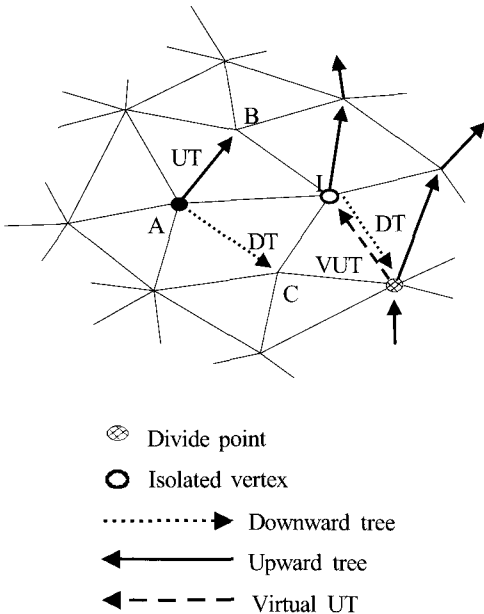


Fig. 2 Concept of upward tree(UT) and downward tree(DT) edge

2.4 기하학적 성질 결정

최대 경사선을 탐색하는 과정에서 결정된 UTo, UTi, DTo 및 DTi의 존재 개수, 포인터(pointer) 그리고 포인트(pointee)로 구분된 정보를 각 절점에 기하학적 성질로 부여한다. 이를 결정하는 과정은 Fig. 3과 같이 다음과 같은 순서를 따른다.^(10,11)

1단계, 정점(apex)은 유일하게 UTo가 존재하지 않기 때문에 UTo의 존재 여부로 정점을 다른 점들과 구분한다.

2단계, UTi의 존재개수를 기준으로 UTi가 존재하지 않는 함몰점(sink), 고립점(isolated point) 그룹, UTi가 1개 존재하는 보통점(normal), 계곡점(valley)그룹, 그리고 UTi가 2개 이상 존재하는 합치점(combine), 능선점(ridge) 그룹으로 분류한다.

3단계, 1단계 그룹에서 DTo의 존재유무로 DTo가 없고 경계점(boundary vertex)이 아니면 함몰점, DTo가 존재하고 경계점이 아니면 고립점으로 분류하고, 2단계 그룹에서 DTi의 존재개수를 기준으로 1개 존재하면 보통점, 1개 이상 존재하면 계곡점으로 분류한다. 마지막으로 3그룹에서는 2개 이상 존재하는 UTi가 UTo를 중심으로 연결점을 확장했을 경우 한쪽으로는 존재하면 합치점, 양쪽으로 존재하면 능선점으로 분류한다.

4단계, 3단계에서 분류된 고립점을 VUTi의 상대관계에 따라 연결한 후, 이 상대점을 지정하여 위의 6가지 기하형태와는 독립적으로 분기점으로 정의한다.

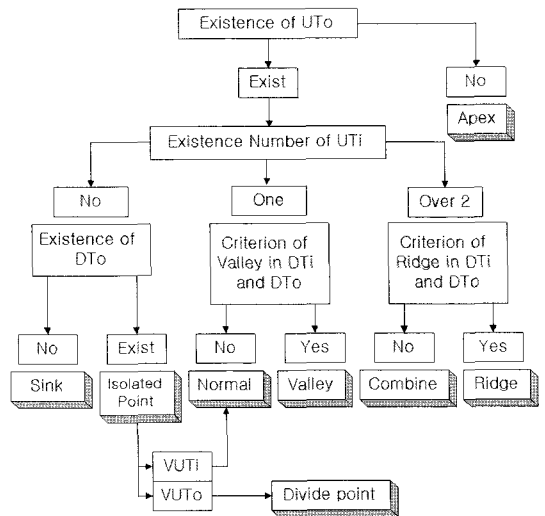


Fig. 3 Recognition of geometric types

이 때 정점은 모든 이웃 절점들에 대해 UTi를 가지며 함몰점은 모든 이웃 절점들에 대해 DTi를 갖는다. 최대 경사상향 트리구조에 있어서 함몰점은 항상 적어도 한 가지의, 연속적으로 연결된 UTo들의 상향 경로를 통해 정점 또는 UTo를 갖지 않는 경계점에 도달될 수 있다. 또한 UTi를 갖지 않는 경계점에 항상 적어도 한 가지의, 연속적으로 연결된 UTo들의 상향 경로를 통해 정점 또는 UTo를 갖지 않는 경계점에 도달될 수 있다. 이 같은 성질에 근거하여 볼 때 함몰점과 UTi를 갖지 않는 경계점들은 최대 경사 상향트리 경로를 결정할 때에 경로 출발점(path start point)들로 지정될 수 있다.

2.5 가공경로 결정

최대경사 상향 경로에는 일반적으로 많은 분기된 경로가 존재한다. Fig. 4와 같이 곡면을 오른쪽부터 순차적으로 절삭하는 절차를 기준으로 하여, 오른쪽 경로가 왼쪽 경로보다 우선적으로 선택되는 우측 선행규칙(rule to select right way)을 설정하였다.

이 규칙의 적용을 위해서는 정지점(check point)과 복귀점(return point)의 개념이 필요한데, 정지점은 한 갈래의 절삭경로가 종료되는 끝점으로 정의되고, 어느 절삭경로가 진행 중 정지점에 도달하면 절삭이송을 멈추고 급속이송으로 차기 절삭경로의 출발점으로 귀환하여야 하는데, 이점을 복귀점으로 정의한다.

한편 최대경사 상향 경로들을 구성하는 데에 있어서 경로 출발점과 분기점은 복귀점의 역할을 담당하고, 정점은 항상 정지점의 역할을 담당한다. 합치점과 능선점은 적어도 한번

의 절삭경로가 이 점들을 통과한 다음에 정지점의 역할을 담당한다. 일련의 UTo가 우측 선행규칙에 따라 연속적으로 연결될 때 복귀점(경로 출발점 또는 분기점)을 출발하여 정지점에 도달할 때까지의 UTo들이 연결된 1개의 경로는 개별경로(individual path)라 정의하며, 경로 출발점에서 시작하여 다음의 경로 출발점에 도달할 때까지 연결된 개별경로의 집합은 분단경로(branch path)라고 정의한다.

3. 미절삭 체적의 가공 알고리즘

3.1 공구간섭의 회피 특성

공구 간섭(gouging)은 가공시 공구가 가공면의 내부를 침범하는 현상으로 정의하며, 이러한 현상이 생기지 않도록 공구의 위치를 결정하는 것을 공구 간섭 회피(gouging avoidance)라 정의한다. 본 연구에서는 삼각형 요소화된 곡면상의 모든 절점에 대한 z-map 모델을 이용하여 공구간섭이 발생할 수 있는 유형들을 추출한 후, 간섭이 생기지 않는 가장 낮은 위치를 결정하는 방법을 공구 간섭 회피 방법으로 사용하였다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 예상 접촉점 P(현행 절점)로부터 커터 원호를 둘러싸는 최근접 내부루프(internal loop)와 외부루프(external loop)를 구하고, 이를 구하는 과정에서 커터원호와 교차하는 횡단 에지들의 양단 절점 리스트들을 결정하였으며, 내부루프로 둘러싸고 있는 모든 내부점(inner point)들을 결정하였다. 이렇게 결정된 각 절점의 속성과 상호 토폴로지를 이용하여 공구간섭 회피 유형을 다음과 같이 6가지로 구분하여 공구의 z값을 결정하였다.

(1) 간섭 회피 유형 1

내부루프의 내부에 존재하는 점들 중에서 최대점(max-

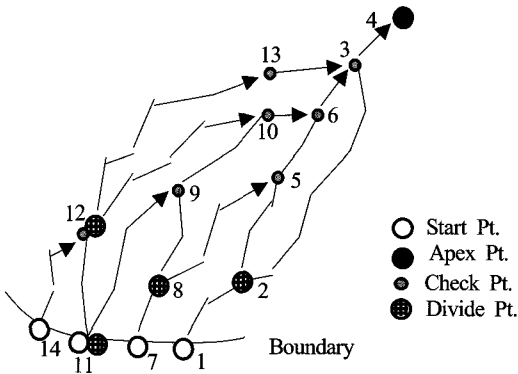


Fig. 4 Determination of cutter paths based on rule to select right way

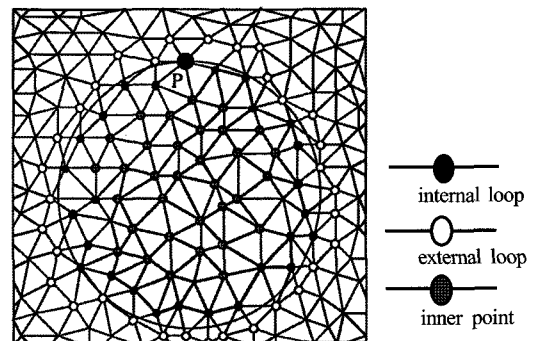


Fig. 5 Built-up interference check using z-map

inside)이 내부루프 최대점(max-loop-in)과 외부루프 최대점(max-loop-out)보다 동시에 큰 경우(Fig. 6), 커터의 간섭이 내부에서 가장 먼저 일어날 수 있으므로 이 최대 내부 높이값을 커터 높이값으로 결정한다.

(2) 간섭 회피 유형 2

횡단에서의 내부점(loop-in)이 횡단에서의 외부점(loop-out)보다 높고 현행점(P)보다 큰 경우(Fig. 7)에는 횡단에서의 내부루프 점의 높이를 커터의 높이값으로 결정한다.

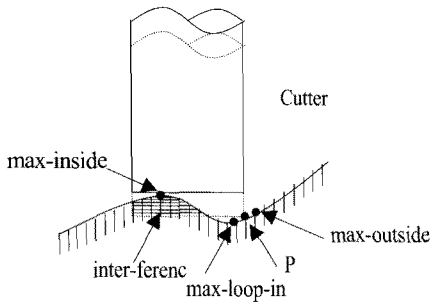


Fig. 6 Avoidance type 1 of gouging

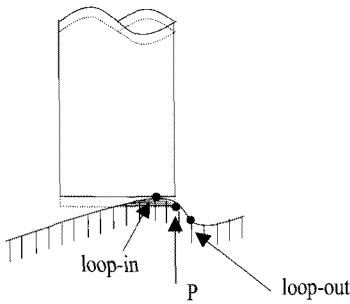


Fig. 7 Avoidance type 2 of gouging

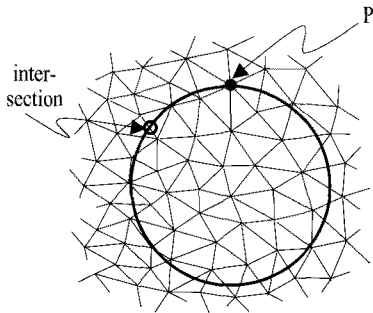


Fig. 8 Avoidance type 3 of gouging

(3) 간섭 회피 유형 3

횡단에서의 커터 원호와의 교차점 높이값이 현행점의 높이값보다 큰 경우(Fig. 8), 이 교차점의 높이를 커터의 높이값으로 결정한다. 이 유형의 간섭은 곡면 전반에 걸쳐서 존재하는 일반적인 간섭이다. 전체적인 곡면형상이 변하지 않는 범위에서 현행점의 z값에 패치 간격에 따른 여유값을 더함으로서 이 불완전 간섭을 회피할 수 있도록 한다.

(4) 간섭 회피 유형 4

함몰점에서부터 모든 절점에 대한 거리값(xy-평면)을 구하여 공구 반경보다 작을 경우는 간섭이 생길 수 있는 것으로 취급한다.(Fig. 9) 이때 높이값은 간섭 회피 유형 3에서와 동일한 방법으로 결정한다.

(5) 간섭 회피 유형 5

함몰점 이외에도 곡률이 오목하여 가공이 안되는 영역(예, 타원형의 양끝)에서 발생하는 유형(Fig. 10)이다. 이때 높이값은 간섭 회피 유형 3과 같이 결정한다. 간섭 회피 유형 4와 5의 경우는, 작은 공구를 사용하여 미절삭부위를 단계적으로

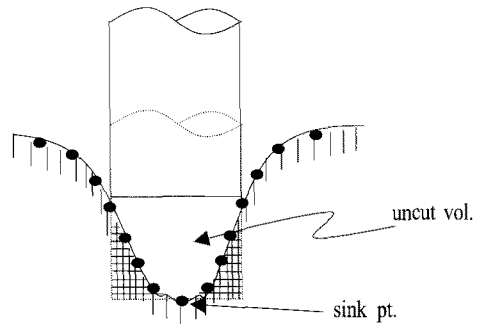


Fig. 9 Avoidance type 4 of gouging

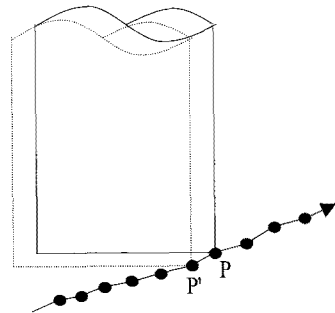


Fig. 10 Avoidance type 5 of gouging

로 가공하기 위해 별도로 점의 그룹을 형성해 둔다.

(6) 간섭 회피 유형 6

모든 가공경로 리스트의 결과가 나온 후 각각의 가공경로에서 현행 절점(P)의 높이값이 이전 절점(P') 높이값 보다 작은 경우가 생길 수 있다.(Fig. 11) 이는 최대 경사선의 정의에 위배되므로 이를 간섭으로 간주하며 이 현행점의 높이값을 이전점의 높이값으로 취한다.

위의 6가지 유형 중에서 볼록한 복합곡면의 교차부(에지)에 생기는 미절삭체적은 주로 간섭 회피 유형 3에 의해서 검색된다. 반대로 오목한 곡면에 생기는 미절삭체적의 간섭은 주로 유형 4와 5에 의해서 검색된다. 이러한 경우는 공구의 직경을 작게 함으로써 미절삭 체적을 줄일 수 있다.

3.2 다단계 가공경로의 산출

직경이 큰 평엔드밀을 사용하여 전체 곡면의 형상을 가공할 때 미절삭 체적이 발생하는데, 이 영역을 보다 작은 직경의 평엔드밀을 사용하여 2차, 3차 단계적으로 가공하는 것을 다단계(multi-step) 가공으로 정의한다. 처음부터 작은 직경의 평엔드밀을 사용하면 미절삭 체적이 1차 가공만으로도 충분히 줄어들 수 있으나 그와 비례하여 가공시간이 많이 걸리고 전체적으로 형상이 거칠게 나온다.

간섭이 회피된 경로 리스트의 직전 점과 직후 점을 연결시키는 방법은, 우선 간섭이 체크된 절점이 경로 시작점이면 이전 점은 제거시키고, 또 경로의 끝점일 때에도 이후 점은 제거시킨 후, 경로 시작점과 끝점은 다음과 같은 방법으로 연결하여 2차 경로를 생성한다.

- (1) 현행 절점을 기준으로 전점과 후점의 간섭 여부를 조사한다. 전점과 후점에서 둘 다 간섭이 일어나면 현행 절점만 경로에 포함시킨다.(Fig. 12의 c점)

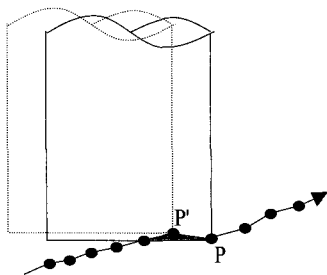


Fig. 11 Avoidance type 6 of gouging

- (2) 현행 절점을 기준으로 전점만 간섭이 있을 경우는 현행 절점과 후점을 경로에 포함시킨다.(Fig. 12의 d, e점)
- (3) 현행 절점을 기준으로 후점만 간섭이 일어날 경우는 현행 절점과 전점을 경로에 포함시킨다.(Fig. 12의 a, b점)
- (4) 전점과 후점에서 둘 다 간섭이 없다면 전점, 현행 절점, 그리고 후점을 경로에 포함시킨다.(Fig. 13의 a, b, c점)

4. 적용 실험 및 고찰

본 알고리즘의 적용성을 평가하기 위하여 타원형 복합곡면의 교차부위에 대한 평가실험을 실시해 보았다. 전체 크기는 60×60×10mm이고 메쉬 크기는 1.68mm이다. 곡면형상은 Fig. 14(a) 및 (b)에서 보이는 바와 같다.

본 가공실험에서는 곡면의 크기에 대응하여 커터 직경을 1차 중삭가공에서는 $\Phi 12\text{mm}$ 로 하였고, 2차 잔삭가공에서는 $\Phi 4\text{mm}$ 의 평엔드밀을 사용하였다. 이때 1차 중삭가공의 가공경로(곡면과 커터의 접촉점 기준)는 Fig. 15(a)와 같이 최대 경사방향을 따라서 일관성 있게 잘 연결되는 것을 볼 수 있었으며, 이 가공에 따른 미절삭 체적은 Fig. 15(b)와 같이 복합곡면의 교선 부위 4곳에서 정상적으로 발생되는 결과를 볼 수 있었다. 한편 이들 미절삭 체적에 대한 2차 잔삭가공은 Fig. 16(a)와 같이 교선부위를 최대 경사방향으로 가공하는 절삭경로를 순차적으로 연결하는 경로를 잘 산출해 내고 있었으며, 2차 잔삭가공 후의 미절삭체적은 Fig. 16(b)와 같이 대폭 줄어든 결과를 보여 주었다.

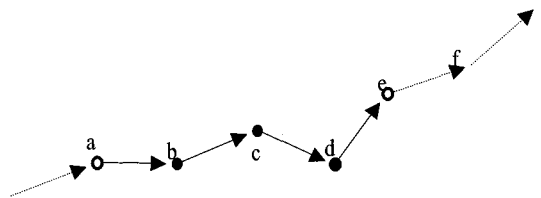


Fig. 12 General cases of path connecting

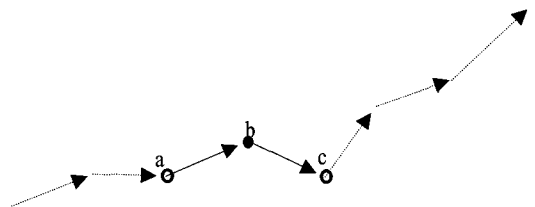
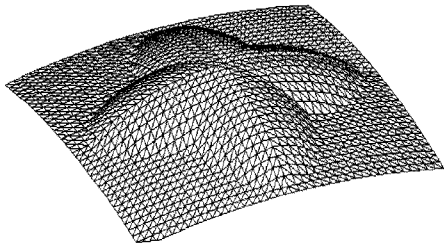
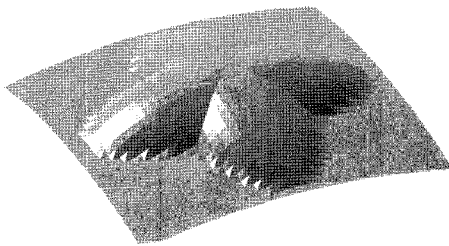


Fig. 13 Special cases of path connecting

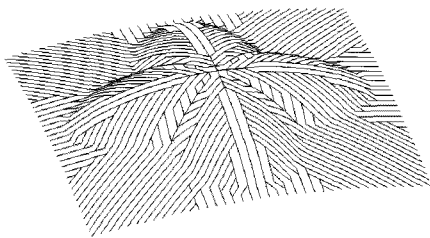


(a) View of geometric forms

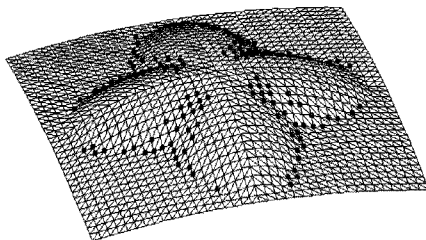


(b) Rendered display

Fig. 14 Model view for application test



(a) Cutter paths by Φ12mm



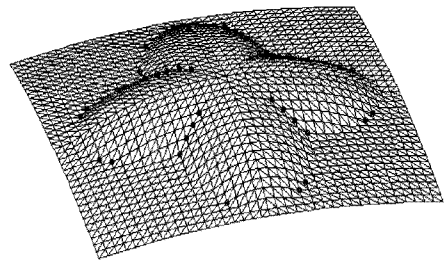
(b) Uncut volumn

Fig. 15 Result after 1st step machining

한편 실제의 가공 체적을 검토하기 위하여 1차 중삭가공 후의 가공표면을 청색 잉크로 도색하고 2차 잔삭가공을 실



(a) Cutter paths by Φ4mm



(b) Uncut volumn

Fig. 16 Result after 2nd step machining

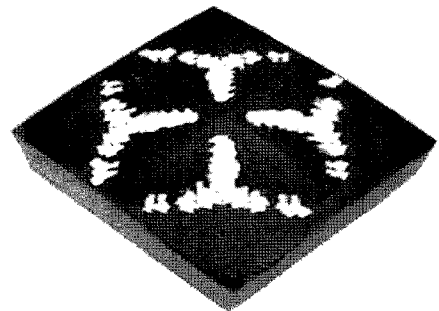
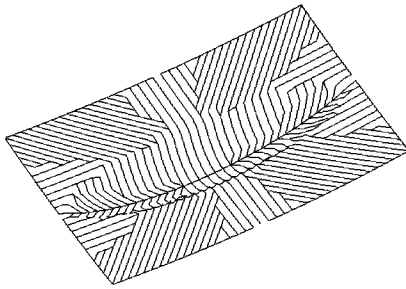


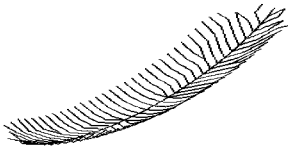
Fig. 17 Machined workpiece by 2nd step machining paths

시하였는데, 이는 Fig. 17과 같이 4곳의 교차 부위에서 일관성 있게 가공되고 있음을 관찰할 수 있었다.

또한 오목한 곡면 부위에 대해서도 잔삭가공이 원활하게 산출되는 가를 검토하였는데, 그 결과에 있어서도 Fig. 18의 (a) 및 (b)와 같이 오목한 홈 부위를 점차적으로 잘 가공하고 있음을 검토할 수 있었다.



(a) 1st step machining paths



(b) 2nd step machining paths

Fig. 18 Test result for concave region

5. 결론

본 연구는 삼각형 요소로 근사된 곡면모델을 대상으로 평 엔드밀 커터를 사용하여 황삭가공 후의 미절삭 체적을 다단계로 잔삭가공하는 알고리즘을 고안하였다.

이를 소프트웨어로 구성하는 과정에서는 6가지의 간섭 회피 유형과 삼각형 요소화 된 곡면의 절점에 대한 기하학적 토폴로지를 정의할 수 있었으며, 이 성질들을 이용하여 최대 경사 방향선을 따르는 가공경로를 성공적으로 산출해 낼 수 있었다. 또 커터의 z-map을 통해 간섭 회피를 위한 높이 값을 추적하여 미절삭 체적이 생기는 영역과 그 방향성을 산출해 낼 수 있었으며, 이 영역을 2차 잔삭가공으로 가공해 나가면서 미절삭 체적을 단계적으로 줄여 나갈 수 있었다. 여기서 개발된 알고리즘들은 타원형 복합곡면의 교차부위에 대한 평가실험을 실시하여 그 적용성을 검토하였으며, 오목한 유형의 모델 실험에 대해서도 잘 적용되고 있음을 확인하였다.

결과적으로 본 연구에서는 평엔드밀을 사용하고 곡면의 곡률 특성이나 미절삭 부위를 고려하여 황삭, 중삭, 정삭, 잔삭 등의 가공 단계를 조화롭게 계획하여 가공하게 되면 절삭 능력도 좋고 절삭시간도 단축되며 표면처칠기도 향상될 수 있는 가능성을 보여 주었다.

그러나 평엔드밀은 커터 직경보다 작은 오목한 부위를 가

공할 수 없는 단점이 있기 때문에 잔삭가공 부위를 추가의 후 가공으로 제거할 수 있는 방법이 절실하다. 또 평엔드밀은 외주 바닥의 날끝에서 마모가 쉽게 생기는 경향이 있으므로 형상 정밀도를 해칠 수 있는 우려가 있다.

따라서 향후에는 적당한 필렛 반경을 갖는 필렛엔드밀을 사용하여 이들 알고리즘을 더욱 확장하면 보다 효과적인 가공이 이루어 질 것으로 본다. 더구나 최근에는 고속밀링가공의 발전과 더불어 초경팁이나 CBN(cubic boron nitride)팁을 사용하는 필렛엔드밀을 많이 사용하는 추세로 발전하고 있기 때문에 최대경사 방향선을 따르는 다단계 가공의 적용 효과가 더욱 클 것으로 기대된다.

참고 문헌

- (1) Vickers, G. and Quan, K., 1989, "Ball-Mills Versus End-Mills for Curved Surface Machining," *ASME Journal of Engineering for Industry*, Vol. 115, Nov., pp. 424~431.
- (2) Ralph-Ip, W. and Loftus, M., 1992, "Cusp Geometry Analysis in Free-Form Surface Machining," *Int. J. of Production Research*, Vol. 30, No. 11, pp. 2697~2711.
- (3) Catania, G., 1992, "A Computer-Aided Prototype System for NC Rough Milling of Free-Form Shaped Mechanical Part-Pieces," *Computers in Industry*, Vol. 21, pp. 275~284.
- (4) Kim, K., Joo, J., Lee, W., and Choi, S., 2008, "Modeling of the Specific Cutting Pressure and Prediction of the Cutting Forces in Face Milling," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 17, No. 5, pp. 17~22.
- (5) Suh, Y. and Lee, K., 1990, "NC Milling Tool Path Generation for Arbitrary Pockets Defined by Sculptured Surfaces," *Computer Aided Design*, Vol. 22, No. 5, pp. 273~284.
- (6) Kim, K. H., 2004, "Effect of Material Removal per Tooth on the Axial Shape of Prismatically Milled Parts," *Trans. of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 13, No. 6, pp. 17~22.
- (7) Li, S. X. and Jerard, R. B., 1994, "5-Axis Machining of Sculptured Surfaces with a Flat-End and Ball-End Cutter," *Computer Aided Design*, Vol. 26,

No. 3, pp. 165~178.

- (8) Maeng, H., Ly, M., and Vickers, G., 1996, "Feature-Based Machining of Curved Surfaces Using the Steepest Directed Tree Approach," *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 15, No. 6, pp. 379~391.
- (9) Maeng, H., 1995, "NC End milling Strategy of Triangulation-Based Curved Surface Model Using Steepest Directed Tree," *Journal of KSME*, Vol. 19, No. 9, pp. 2089~2104.
- (10) Cha, J., 1998, "Multi-stage NC Milling of Uncut Volume caused by Gouging Interference at the Machining of Curved Surfaces," A Thesis for a Master, Seoul National University of Technology, Republic of Korea.
- (11) Faux, I. D. and Pratt, M. J., 1981, *Computational Geometry for Design and Manufacture*, Ellis Horwood, London.