

# 자유곡면의 NC 황삭가공을 위한 자동 공구 선정과 경로 생성

홍 성 의\*, 이 건 우\*\*

## Automatic Tool Selection and Path Generation for NC Rough Cutting of Sculptured Surface

Sung Eui Hong\* and Kun woo Lee\*\*

### ABSTRACT

An efficient algorithm is proposed to select the proper tools and generate their paths for NC rough cutting of dies and molds with sculptured surfaces. Even though a milling process consists of roughing, semi-finishing, and finishing, most material is removed by a rough cutting process. Therefore it can be said that the rough cutting process occupy an important portion of the NC milling process, and accordingly, an efficient rough cutting method contributes to an efficient milling process.

In this work, the following basic assumption is accepted for the efficient machining. That is, to machine a region bounded by a profile, larger tools should be used in the far inside and the region adjacent to relatively simple portion of the boundary while smaller tools are used in the regions adjacent to the relatively complex portion. Thus the tools are selected based on the complexity of the boundary profile adjacent to the region to be machined. An index called 'cutting path ratio' is proposed in this work as a measure of the relative complexity of the profile with respect to a tool diameter. Once the tools are selected, their tool paths are calculated starting from the largest to the smallest tool.

**Key words** : Rough Cutting(황삭가공), NC Milling(NC 밀링 가공), Automatic Tool Selection(자동 공구 선정), Path Generation(경로 생성), Cutting Path Ratio(가공 경로비)

### 1. 서 론

플라스틱 부품이나 자동차, 항공기 부품 등을 생산하

는 금형은 주로 자유곡면으로 이루어져 있는데, 이러한 자유곡면의 금형을 제작하기 위한 방법으로 과거에는 모방밀링(copy milling) 가공방법이 주로 사용되었다.

\* 삼성항공 항공우주연구소

\*\* 서울대 기계설계학과

그러나 NC공작기계의 보급과 CAD/CAM 기술의 발전으로 최근에는 CAD시스템에 의해 제공된 형상 정보로부터 자동으로 공구경로를 생성하여 NC가공하는 방법을 사용하고 있다. 그러나 산업체에서 구현되고 있는 NC가공은 아직도 작업자의 경험에 의존하는 경우가 많고, 결과적으로 CAD/CAM 기술을 충분히 이용하지 못하고 있다. 따라서, 더욱 보편화 될 NC가공에 관한 많은 연구와 개발이 필요하며, 특히 자유곡면을 포함하는 금형제작에 있어서 정밀도와 가공 효율성을 모두 만족시킬 수 있는 NC가공방법의 개발은 매우 시급한 과제이다.

금형의 NC가공은 일반적으로 3단계의 과정으로 이루어지는데, 이는 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 황삭가공(roughing), 중삭가공(semi-finishing), 그리고 정삭가공(finishing)이다.

황삭가공이란, 육면체의 피삭재로부터 가공곡면(part surface)의 안쪽 영역을 제거하여 가공곡면에 근사하도록 가공하는 것이다. 일반적으로 사용자가 지정한 절삭평면들과 가공곡면과의 교선, 즉 프로파일들을 구해 각 프로파일의 내부영역을 사용자가 선정한 평형 엔드밀(flat-end mill)로 Fig. 1(d)와 같이  $2\frac{1}{2}$ 축 가공하는 평면 컨투어링 방법(planar contouring approach)이 사용되고 있다.

황삭가공 후에는 계단형상의 언더컷(under-cut)이 남게 되는데, 이는 중삭가공과 정삭가공을 통해 제거된다. Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 중삭과정의 가공곡면은 황삭과정과 마찬가지로 실제 가공곡면으로 부터 여유치 만큼 읍셋된 곡면이다. 볼 엔드밀(ball-end mill)을 사용하며, 정밀한 금형제작을 위해서는 정삭과정에서 공구에 일정한 반력이 생기도록 하여야 하므로,

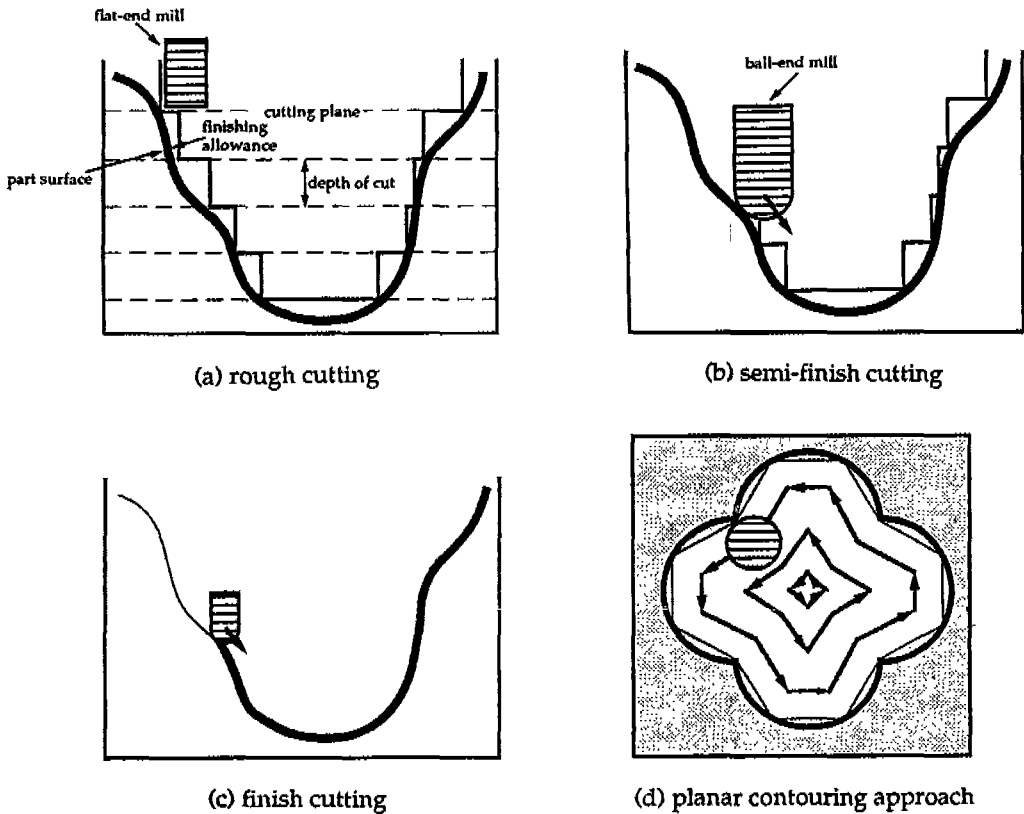


Fig. 1 NC Machining process

공구와 가공곡면과의 간섭이나 언더컷을 최소화하도록 한다.

마지막으로, 정삭가공은 중삭가공을 통해 가공곡면에 가까워진 피삭재를 매우 작은 볼 엔드밀을 사용하여 가공곡면 형상이 되도록 가공하는 것이다. 정삭과정에서도 가공되지 않는 국소부분은 전기방전가공(EDM) 등을 통해 제거되며, 또 자유곡면의 가공은 커스프(cusp)를 발생시키므로 이를 제거하는 사상작업(polishing)이 뒤따른다.

이상에서 살펴본 바와 같이 전 NC 가공과정에서 제거되는 가공체적의 대부분은 황삭과정에서 제거되며, 가공정밀도를 우선적으로 고려하는 정삭가공과는 달리 황삭가공은 가공정밀도에 큰 영향을 미치지 않으므로 가공정밀도와 상반되는 가공시간을 줄이기 위해서는 효율적인 황삭가공이 반드시 필요하다. 그러나 현재 사용되는 황삭가공 알고리즘에는 비효율적인 면이 많은데, 이는 과거 NC 가공에 관한 연구가 자유곡면의 정밀가공을 위한 정삭가공<sup>(4-6)</sup>에 치중되었기 때문이다. 최근 들어 NC 가공속도와 가공효율에 대한 관심이 급증됨에 따라 황삭가공에 관한 연구가 많이 발표되고 있는데, 그 가운데 주된 것을 살펴 보도록 한다.

상용 시스템인 Unigraphics II<sup>(7)</sup>, CATIA<sup>(8)</sup>에서 제공하는 황삭가공은 먼저 사용자에게 의해 가공곡면과 공구, 절삭평면들이 입력되면, 각각의 절삭평면과 가공곡면과의 교선, 즉 프로파일들을 구하고, 그로부터 공구경로를 계산한다. 그러나 가공곡면의 형상이 복잡한 경우에는 공구와 프로파일과의 간섭을 피하기 위해 작은 공구가 선정되는데, 작은 공구하나로 전체를 가공하게 되어 많은 가공시간이 소요되며, 공구의 마멸로 인해 공구를 자주 교환해 주어야 한다.

Y S Lee<sup>(9)</sup>는 다각형 프로파일(polygon profile)의 형상 정보로부터 모든 프로파일을 가공할 수 있는 최대 공구를 자동으로 선정하여, 그 공구로 모든 절삭면을 가공하도록 하였다. 자동으로 공구를 선정한다는 점과 가공곡면의 형상이 복잡한 경우에는 볼 엔드밀이 사용된다는 점이 상용 시스템과 다르지만, 앞에서도 지적했듯이 모든 프로파일들과 간섭을 일으키지 않는 공구 하나만을 사용함으로써, 많은 가공시간과 잦은 공구교환 문제는 여전히 남게 된다.

G Catania<sup>(10)</sup>는 가공곡면과 피삭재의 윗면을 경계로 하여 그 중간에 여러 층의 중간곡면들(intermediate layers)을 정의하고, 각 층의 곡면으로부터 공구 접촉

점(cutter contact point)을 구해 평형 엔드밀로 가공하는 전혀 새로운 방법을 제안하였다. 그러나 절삭깊이(depth of cut)와 절삭너비(width of cut)가 가공중에 계속 변하게 되어 가공속도를 계속 변화시키거나 최소의 속도로 가공해야 하며, 평형 엔드밀은 곡률이 큰 곡면의 가공에는 부적절하므로, 가공곡면의 곡률이 작아야 하는 제한이 있다.

K Lee<sup>(11)</sup>는 가공곡면의 형상 정보로부터 옥트리기법을 이용하여 자동으로 여러 개의 공구를 선정하면서, 각각의 공구에 대한 경로를 생성하도록 하는 황삭가공 방법을 제안하였는데, 이는 옥트리 분할에 의해 새로운 Full형 팔분체가 얻어질 때마다, 적절한 공구를 선정하여 그 공구로 Full형 팔분체를 제거하도록 하는 것이다. 즉, 먼저 선정되는 큰 공구로 전체를 대략 가공한 후, 다음으로 선정되는 보다 작은 공구들로 남은 국소의 복잡한 형상을 차례로 가공하여 효율적인 가공이 되도록 하였다. 그러나 가공곡면의 형상이 복잡하면 너무 많은 공구들이 선정되어 공구경로가 복잡해지는 단점이 있다.

본 연구에서는 이상과 같은 황삭가공의 단점들을 보완하는 효율적인 황삭가공 알고리즘을 개발하였는데, 이는 절삭면 상의 프로파일 형상에 의해 자동으로 선정된 일련의 공구들을 차례로 적용시키면서, 프로파일의 내부영역과 프로파일 경계영역의 형상이 단순한 부분을 큰 공구로 먼저 가공하고, 남아 있는 복잡한 형상의 프로파일 경계영역을 보다 작은 공구로 가공하도록 하는 것이다. 이때 프로파일의 형상으로 부터 공구들을 자동으로 선정하기 위하여 '가공경로비'라는 개념을 제안하였다. 본 연구의 알고리즘은 서울대학교 CAD연구실에서 개발한 곡면 모델러(Surface Modeler)를 이용하여 구현되었다.

## 2. 자동 공구 선정

효율적인 황삭가공을 위하여 먼저 황삭가공의 특징들을 정의하였는데, 이는 다음과 같다.

첫째, 황삭과정에서 제거되는 절삭량은 전체 가공체적의 대부분을 차지한다.

· 1장에서 살펴본 바와 같이 육면체의 피삭재는 황삭가공을 통하여 가공곡면의 형상에 근사하게 되며, 중삭가공과 정삭가공을 통하여 가공곡면의 형상이 된다. 따라서 가공체적의 대부분(약 70%)은 황삭과정에서 제거된

다.

둘째, 공구선정에 따라 가공의 효율성이 결정된다.

황삭가공은 절삭량이 많은 작업으로서, 공구 크기에 따라 전체 가공시간의 차이가 크게 된다. 따라서 상용 시스템과 같이 사용자에게 의해 선정된 공구로는 효율적인 황삭가공을 기대할 수 없으며, 모든 프로파일과 간섭을 일으키지 않는 최대공구를 사용하는 경우에도, 최대공구 한개만으로 가공하는 것보다는 더 큰 공구들로 먼저 가공한 후에 최대공구로 나머지 부분만을 가공하는 것이 더 효율적이다.

세째, 황삭가공은 비정밀 가공이다.

황삭가공에서의 가공곡면은 실제 가공곡면으로부터 여유치 만큼 읍셋된 곡면이며, 가공되는 영역은 읍셋된 가공곡면의 내부영역이므로 황삭가공은 가공곡면에 영향을 미치지 않는다. 따라서 황삭가공은 가공정밀도를 최우선적으로 고려하는 정삭과는 달리, 가공정밀도 보다는 가공효율, 즉 가공시간과 가공비용을 먼저 고려하여야 한다.

네째, 황삭가공은 비완성의 가공이다.

황삭가공은 정삭가공의 예비 단계로서, 황삭가공 후의 형상은 과도기의 형상이다. 따라서 프로파일의 내부영역이 완전히 가공되지 않아도 무방하다. 왜냐하면, 모든 프로파일의 내부영역이 완전히 가공되었다. 해도 각 절삭면 사이에는 여전히 계단형상의 언더컷이 남게 되며, 이런 부분은 중삭과정에서 제거되기 때문이다. 따라서 일부 프로파일의 복잡한 형상을 가공하기 위해 매우 작은 공구를 선정하는 기존의 알고리즘에는 문제가 있다.

본 연구에서는 이상과 같은 황삭가공의 특징들을 고려하여, 자동으로 일련의 공구들이 선정되도록 하였는데, 이를 위하여 프로파일의 형상정보로부터 '가공경로비'라는 지표를 정의하였다.

### 2.1 가공경로비(Cutting Path Ratio)

황삭가공은 정의된 절삭평면과 가공곡면과의 교선, 즉 프로파일의 내부영역을 제거하는 것인데, 공구가 프로파일과 간섭을 일으키지 않으려면, 공구반경이 프로파일 곡선의 최소 곡률반경 보다 작아야 한다. 실제로 Y S Lee<sup>6)</sup>는 프로파일 곡선의 최소 곡률반경을 반경으로 하는 최대공구를 선정하도록 하였는데, 본 연구에서는 최대공구보다 더 큰 공구를 사용하면서도 프로파일과 간섭을 일으키지 않기 위해, Fig. 2(a)에서와 같이

프로파일을 공구반경만큼 읍셋한 곡선을 정방향루프(path-loop)와 역방향루프(self-loop)로 분리하여 가공곡면과 간섭을 일으키게 되는 역방향루프를 제거한 정방향루프만을 공구경로로 사용하도록 하였다. 여기서 정방향루프란 읍셋에 의해 얻어지는 루프 중 원래 경계루프와 같은 방향성을 갖는 루프이고, 역방향루프란 읍셋에 의해 경계루프가 줄어들면서 꼬일때 생기는 루프로 원래 경계루프와 반대의 방향성을 갖는 루프를 뜻한다. 이때 역방향루프를 공구경로에서 제외시키면 프로파일 내부에 가공되지 않는 언더컷이 남게 되지만, 보다 작은 공구로서 남은 영역을 제거하면 최대공구 한개만으로 전부를 가공하는 방법보다 훨씬 효율적이다.

본 연구에서는 임의의 공구에 대해 얻어지는 정방향루프와 역방향루프로부터 다음과 같이 가공경로비라는 지표를 정의하여, 이를 주어진 프로파일에 대한 공구 크기의 타당성을 나타내는 척도로 사용하였다.

$$\text{가공경로비} = \frac{\text{정방향루프의 길이}}{\text{정방향루프의 길이} + \text{역방향루프의 길이}}$$

즉, 가공경로비가 너무 작으면 언더컷이 너무 많아 선택된 공구가 너무 크다는 것을 의미하고, 반대로 가공경로비가 거의 1에 가까우면 선택된 공구가 모든 영역을 가공하기는 하지만 필요 이상으로 작아 비효율적일 수도 있음을 나타낸다. 따라서 사용자가 정의하는 황삭가공의 정밀도로부터 적절한 가공경로비를 만족시키는 공구가 주어진 프로파일에 대해 적절한 공구라 할 수 있다. Fig. 2(a)는 정방향루프만을 공구경로로 함으로써 발생하는 언더컷을 보여 주고 있는데, 역방향루프의 길이는 가공 후에 남는 언더컷과 비례한다는 것을 알 수 있다.

한편, 황삭가공의 정밀도는 절삭면 간의 간격, 즉 절삭깊이에 따라 매우 민감하게 변하게 되는데, 앞에서 살펴 보았듯이 절삭면들 위에 정의된 프로파일의 내부영역을 완전히 제거한다 해도, 절삭면들 사이에는 여전히 계단 형상의 언더컷이 남아 있어 반드시 중삭과정을 거쳐야만 가공곡면의 형상이 된다. 따라서 프로파일의 국소부분이 가공되지 않았다고 해서 반드시 남은 부분을 더 작은 공구로 가공해야 하는 것은 아니다. 왜냐하면 이러한 영역은 중삭과정에서 제거될 수 있기 때문이다.

본 연구에서는 가공 후 프로파일 내에 언더컷이 남지 않는 공구의 선정을 기본 원칙으로 삼는 일반적인 황삭

알고리즘과는 달리, 프로파일의 가공경로비가 주어진 가공정밀도를 만족시키면, 비록 언더컷이 남아 있더라도 그 프로파일은 더 이상 가공되지 않도록 하였다.

## 2.2 공구 선정 과정

2.1절에서 정의된 가공경로비를 이용해서 일련의 공구들을 선정하는 과정을 단계별로 자세히 살펴보겠다.

(단계 1) 우선 사용자는 선정될 수 있는 후보 공구들의 지름과 유효 절삭깊이를 입력하여, 공구 데이터베이스를 구성한다. 여기서 공구의 유효 절삭깊이는 피삭재의 재질을 고려해야 하며, 원하는 황삭가공의 정밀도와 피삭재의 치수도 함께 입력한다.

(단계 2) 구성된 공구 데이터베이스에서 가장 큰 공구부터 첫번째 공구로서의 타당성을 검사한다. 먼저 공구의 유효 절삭깊이를 절삭깊이로 하여 피삭재의 윗면에서부터 절삭깊이 만큼씩 내려오면서 절삭면들을 정의하고, 그 절삭면과 가공곡면과의 교선, 즉 프로파일을 얻어낸다. 그리고, 이 프로파일을 공구의 반경만큼 읊셋하여 2.2절에서 언급한 가공경로비를 구하고, 원하는 가공정밀도, 즉 'FirstToolRatio'보다 크면, 계속해서 그 아래의 다음 절삭면에 대해 같은 방법으로 가공경로비를 구한다. 여기서 FirstToolRatio는 원하는 황삭가공의 정밀도에 따라 사용자가 입력하도록 하고 있다.

만일, 모든 절삭면들에 대한 가공경로비가 모두 FirstToolRatio 보다 크게 되면, 그 공구가 첫번째 공구로 선정된다. 그러나, 어느 하나의 절삭면에 대해서도 FirstToolRatio 보다 작은 가공경로비가 얻어지면, 이 공구는 첫번째 공구로 적절치 않은 것이므로, 다음으로 큰 공구에 대해서 같은 검사를 한다.

이렇게 해서 첫번째 공구가 선정되면, 모든 프로파일 중에서 가공경로비가 가장 작은 프로파일, 즉 언더컷이 가장 많이 남아 있는 프로파일이 검사 프로파일(test profile)이 되는데, 이것은 몇개의 공구를 사용할 것인지를 결정하는 기준이 된다.

(단계 3) 선정된 첫번째 공구와 검사 프로파일로부터 일련의 공구들을 선정한다. 이때에 새로 선정되는 공구는 바로 전에 선정된 공구의  $\frac{1}{2}$ 크기가 되도록 하였는데, 여기에는 다음과 같은 두가지 이유가 있다.

첫째, 본 연구에서는 효율적인 가공을 위하여 공구의 유효 절삭깊이를 황삭가공의 절삭깊이로 하고 있는데, 새로운 공구에 대한 새로운 절삭면들을 정의함에 있어

서 이미 정의된 절삭면들을 계속 이용하여 필요 이상으로 많은 절삭면들 정의하지 않기 위함이다.

즉, 절삭깊이를  $\frac{1}{2}$ 씩 줄임으로써 기존의 절삭면들과 그 사이사이에 새로 정의되는 절삭면들을 절삭면으로 하고자 하였는데, 절삭깊이는 곧 공구의 유효 절삭깊이이므로 공구의 지름과 비례하게 된다. 따라서 절삭깊이를  $\frac{1}{2}$ 씩 줄인다는 것은 공구의 크기를  $\frac{1}{2}$ 씩 줄이는 것과 일치하게 된다. 실제로 산업체에서는 공구지름의 0.7~0.85배를 공구의 유효 절삭깊이로 사용하고 있는데, 가공곡면의 형상과 피삭재의 재질에 따라 다소 차이가 있다.

둘째, Fig. 2(a)는 주어진 프로파일을 첫번째 공구로 가공한 결과인데, 프로파일과의 간섭을 방지하기 위해 공구경로로 정방향루프만을 사용하므로 역방향루프에 해당하는 언더컷이 남게 된다. 이 남은 부분은 다음 공구, 즉 첫번째 공구의  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구를 사용하면 Fig. 2(d)와 같이 한번의 공구경로로 남은 영역이 제거된다. 만일, 첫번째 공구반경의  $\frac{1}{2}$ 보다 작은 반경의 공구를 두번째 공구로 사용하게 되면 Fig. 2(b)와 같이 한번의 공구경로로 제거할 수 없으며, 또  $\frac{1}{2}$ 보다 큰 공구를 사용하면 Fig. 2(c)에서와 같은 언더컷이 남을 수 있다. 물론  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구를 사용해도 언더컷이 남을 수 있지만,  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구를 사용하는 것이 한번의 공구경로로 완전히 가공할 수 있는 확률이 가장 크기 때문에 첫번째 공구반경의  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구를 두번째 공구로 선정하는 것이 가장 적절하다고 할 수 있다. 그리고  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구를 사용해도 언더컷이 남는 경우에는, 그 남은 부분을 그 다음의 공구로 제거하면 된다.

이렇게 해서 첫번째 공구의  $\frac{1}{2}$ 크기인 공구가 두번째 공구로 선정되면, 이 공구로써 검사 프로파일에 대한 가공경로비를 구해 보아 이 비가 'LastToolRatio'보다 크면, 즉 언더컷을 많이 남기지 않고 대부분의 영역이 가공되면 이 공구가 마지막 공구가 되며, 그렇지 않으면 다시 다음의  $\frac{1}{2}$ 크기의 공구에 대해 같은 검사를 한다. 이와 같은 방법으로 마지막 공구가 선정되면, 첫번째 공구에서부터 마지막 공구까지 가공에 사용할 모든 공구의 선정은 끝나게 된다. 여기서 LastToolRatio는 가공정밀도에 따라 사용자로부터 입력되는데, Table 1은 시스템이 제안하는 값이며, 사용자는 새로운 값을 입력할 수 있다.

(단계 4) 일련의 공구들이 선정되면 시스템은 이 공구들을 사용자에게 추천하게 되고, 이것이 만족스러우

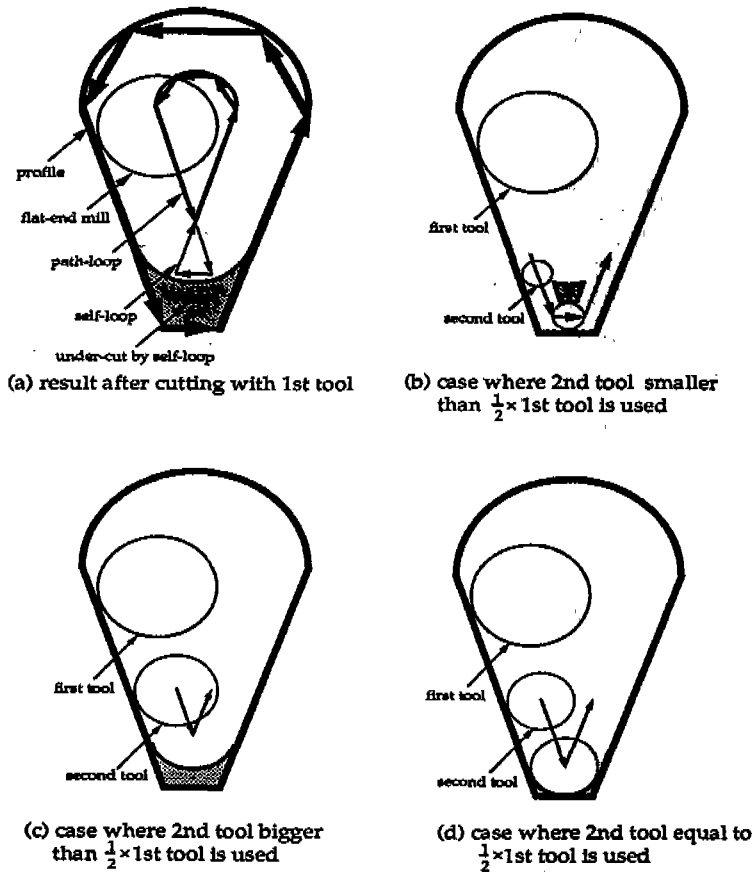


Fig. 2 Selection of the second tool

면 사용자는 시스템이 추천하는 일련의 공구들 중 현재 공구 데이터베이스에 없는 공구를 추가로 입력해야 한다. 그러면 시스템은 사용자가 입력한 공구들을 정리하여 최종적으로 가공에 사용할 공구들을 결정하고 공구 경로 생성과정으로 들어가게 된다. 만일, 시스템이 추천한 공구들이 만족스럽지 않으면, 사용자는 가공정밀도나 공구데이터를 새로 입력하여 새로운 공구들이 다시 선정되도록 한다.

Precision	FirstToolRatio	LastToolRatio
Rough	0.60	0.90
Normal	0.70	0.95
Precise	0.80	1.00

Table 1 Default values of FirstToolRatio and Last-ToolRatio

### 3. 공구 경로 생성

#### 3.1 읍셋에 의한 경로 생성

절삭면 상에 정의된 프로파일 곡선의 내부영역은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 읍셋된 프로파일을 공구경로로 함으로써 제거될 수 있다. 이때 처음으로 읍셋되는 프로파일은 경계 프로파일로부터 공구반경 만큼 읍셋되어 얻어지며, 다른 읍셋 프로파일들은 절삭너비만큼 읍셋된다. 이러한 읍셋 프로파일에 의한 공구경로 생성 방법은 다음과 같은 문제점들을 갖는다.

첫째, 임의의 형상의 프로파일 곡선으로부터 읍셋 프로파일을 계산하는 것은 단순한 문제가 아니다. 특히 NURBS<sup>(12)</sup>곡선으로 부터 읍셋되는 NURBS곡선을 정확하게 구한다는 것은 불가능하므로, 근사화된 읍셋 곡선을 구하게 되는데, 그로부터 오차가 발생한다.

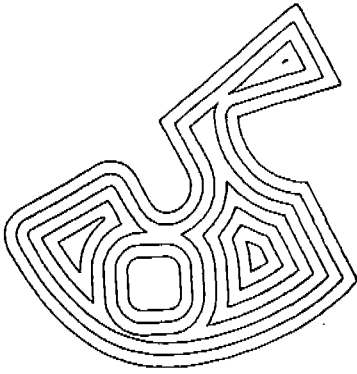


Fig. 3 Tool path generation by continuously offsetting boundary profile

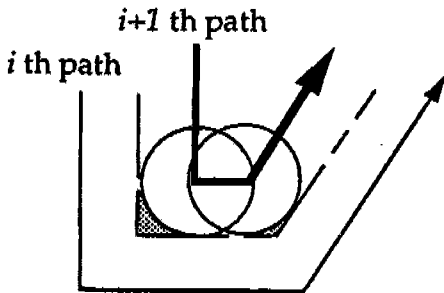
둘째, 정확하게 오프셋된 프로파일 곡선을 구한다 해도 공구경로는 선분들로 이루어지므로 프로파일 곡선은 다시 다각형 (polygon)으로 근사화 된다. 따라서 정확한 오프셋 프로파일 곡선을 구한다는 것은 불필요한 과정이

다.

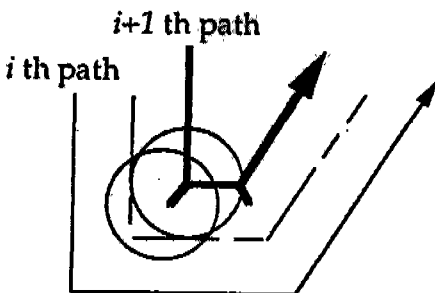
이와 같은 문제들을 해결할 수 있는 한가지 방법은 경계 프로파일을 다각형으로 근사화시킨 후에 그 프로파일 다각형을 오프셋시켜 공구경로를 구하는 것이다. 물론 프로파일 곡선을 다각형으로 바꿀 때 곡선과의 오차가 발생하게 되고, 이 오차는 공구경로의 허용공차 (allowable deviation)가 되므로 이 값이 사용자가 지정한 최대 허용공차보다 작도록 해야 한다.

다각형 프로파일의 오프셋에서도 공구반경을 오프셋거리로 하는 첫번째 오프셋 프로파일을 제외한 그 이후의 오프셋거리는 절삭너비가 된다. 그런데 한가지 문제는 경계 프로파일 내부에 아일랜드 (island)가 남을 수 있다는 것이다. Fig. 4(a)는 공구지름을 절삭너비로 가정했을 때에 남게 되는 아일랜드를 보여 주고 있다. CATIA<sup>(8)</sup>에서는 이를 해결하기 위해 Fig. 4(b)와 같이 공구경로의 방향이 변하는 부분에 아일랜드를 제거하는 경로를 추가하였다. Gosling<sup>(14)</sup>은 경계곡선 내부에서의 다각형 오프셋으로 생기는 역방향루프를 제거하지 않고, 이를 공구경로에 포함시켜 아일랜드를 제거하는 방법을 제안하였는데, Fig. 4(c)에서 볼 수 있듯이 너무 많은 경로가 추가되는 단점이 있다.

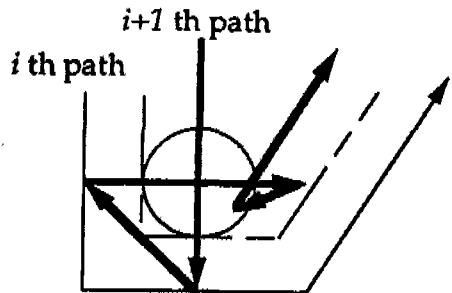
한편, 이러한 문제 이외에도 다각형이 안쪽으로 오프셋 되면 될수록 선분의 길이가 줄어드는 것과는 달리, 다각형 위의 점들은 같은 개수를 유지하게 되므로 다각형의 형상은 점점 복잡해진다. 따라서 오프셋의 끝조건을 찾기가 어려워지고, 공구경로도 복잡해지는 경향이 있다. 본 연구에서는 앞에서 지적한 문제들을 해결하기 위해 곡선 오프셋이나 다각형 오프셋이 아닌 지그재그 방법을 이용하여 공구경로를 구하였다.



(a) island caused by tool path of offset polygon



(b) method used in CATIA



(c) Gosling's algorithm

Fig. 4 Methods to remove island

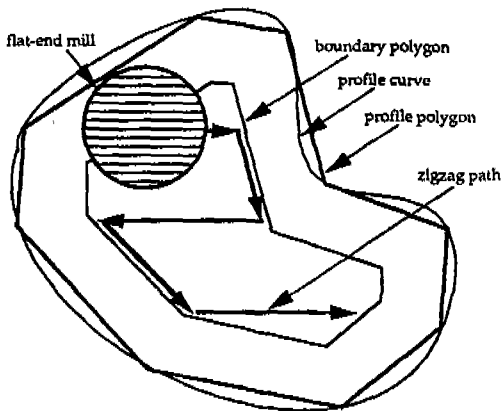


Fig. 5 Zigzag cutting algorithm

### 3.2 프로파일의 지그재그 가공

3축 가공과는 달리 황삭가공은 절삭면 상에 정의된 프로파일의 내부영역을 제거하는 2축 가공인데<sup>(3)</sup>, 이러한 2D 형상의 프로파일을 가공하기 위한 지그재그 공구경로를 생성하는 알고리즘을 Fig. 5의 예와 함께 설명하겠다.

먼저, 주어진 프로파일 곡선을 공구경로의 최대 허용 공차를 고려하여 다각형으로 바꾼 프로파일 다각형을 구하고, 이 다각형으로부터 공구반경만큼 안쪽으로 읍셋시켜 경계 다각형(boundary polygon)을 구하게 되는데, 이는 공구경로의 경계가 된다.

일단, 경계 다각형이 정의되면, Fig. 5에서 볼 수 있듯이 임의의 한 방향의 선분을 절삭너비, 즉 경로간 격만큼씩 평행이동시키면서 경계 다각형과의 모든 교점을 구하고 이 교점들을 차례로 연결시키면 프로파일 내부영역을 제거하는 지그재그 공구경로(zigzag tool path)가 생성된다.

마지막으로, 경계 다각형을 따라 가공하는 프로파일 링(profiling) 가공으로 프로파일 가공을 마치게 된다.

이상에서 설명된 지그재그 가공 알고리즘을 프로파일 가공에 적용시키면, 3.1절에서 살펴 보았던 곡선 읍셋이나 다각형 읍셋의 모든 문제들을 해결할 수 있으며 공구경로도 매우 단순해지는 장점을 갖게 된다.

### 4. 황삭가공 알고리즘

지금까지 설명한 공구선정과 경로생성 알고리즘들이 효율적인 황삭가공을 위하여 어떻게 통합되는지를 자세

히 살펴 보겠다.

(단계 1) 사용자로부터 공구와 피삭재의 치수, 가공정밀도를 입력 받는다.

(단계 2) 2장에서 설명된 공구선정 알고리즘에 의해 일련의 공구들을 선정한다.

(단계 3) 첫번째 공구로써 피삭재의 가장 윗면에서부터 절삭깊이만큼씩 내려가면서 절삭면들을 정의한다. 각 절삭면과 가공곡면과의 교선 즉 프로파일을 구하고 이 프로파일 곡선을 공구의 최대 허용공차를 최대 보간 오차로 하는 다각형으로 바꾼 후 공구반경만큼 안쪽으로 읍셋시켜 경계 다각형을 얻는다. 그리고 이 다각형에 프로파일 가공 알고리즘은 첫번째 공구로 가공 알고리즘을 적용시켜 각 절삭면의 프로파일의 내부영역을 제거하는 공구경로를 생성한다. 물론 프로파일 가공하게 되는 모든 프로파일에 적용된다. 그리고 각 프로파일에 대해서 구한 가공경로비들 중에서 가공정밀도에 의해 결정되는 LastToolRatio 보다 큰 값을 갖는 절삭면 상에는 언더컷이 조금 남아 있거나 전혀 없는 경우이므로, 그 절삭면의 End-flag가 참이 되게 하여 두번째 공구의 가공시에는 고려되지 않도록 한다. 반면에 가공경로비가 LastToolRatio 보다 작은 절삭면인 경우에는 역방향루프로 인해 남게 되는 언더컷을 두번째 공구로 가공하도록 한다.

(단계 4) 단계 2에서 선정된 공구의 개수가 두 개 이상이면 다시 두번째 공구로써 가공하게 된다. 먼저 첫번째 절삭깊이의 반을 절삭깊이로 하여 단계 3에서와 같은 방법으로 피삭재의 윗면에서부터 절삭깊이 만큼씩 내려가면서 절삭면을 정의하고, 그 절삭면 위에 공구경로를 구하게 된다. 이 때의 절삭면들은 이미 정의된 절삭면들과 그 사이사이에 정의되는 새로운 절삭면 일 것이다. 새로 정의되는 절삭면인 경우에는 단계 3에서와 마찬가지로 프로파일과 그것의 경계 다각형을 구하게 된다. 그러나, 두번째 부터의 공구에 대한 경로는 첫번째 공구와는 다르게 되는데, 그 이유는 새로운 절삭면을 포함한 모든 프로파일의 내부영역은 단계 3에서 이미 제거되었기 때문이다. 따라서 새로 정의되는 절삭면 상의 프로파일 가공은 Fig. 6(a)와 같이 경계 부분의 남은 영역을 가공하게 되며, 이미 정의된 절삭면인 경우에는 End-flag가 참이 아닌 절삭면만을 가공하면 된다. 이때의 공구경로는 프로파일 중 언더컷이 남아 있는 부분, 즉 첫번째 공구경로 생성시 역방향루프를 유발하는 부분에 대해서만 Fig. 6(b)와 같이 두번째



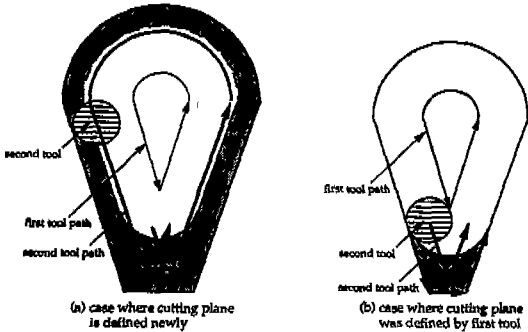


Fig. 6 the second tool path

공구반경만큼 읊셋시켜 구한다.

만일 두번째 공구의 가공경로비가 LastToolRatio 보다 크면 그 절삭면의 End-flag를 참으로 하고, 그렇지 않으면 단계 3에서와 같은 방법으로 언더컷이 남은 부분을 다음 공구로 가공하도록 한다. 그리고 새로 정의된 절삭면인 경우에는 프로파일 부근에 언더컷이 남아 있게 되므로 경계 다각형이 가공경로가 되며, 이 절삭면에 대해서도 전체 프로파일에 대한 가공경로비를 구해 이 값이 LastToolRatio 보다 크면 End-flag를 참으로 하고, 그렇지 않은 경우에는 다음 공구로 가공되지 않은 부분만을 가공하도록 한다. 이 때 프로파일에 대한 두번째 공구의 가공경로비는 두번째 공구까지의 가공 후에 나타나는 절삭면의 가공 완성도를 의미하

```

Rough_Cutting()
{
    Input()
    Workpiece Dimension
    Tool Database
    First Tool Ratio & Last Tool Ratio
}
Tool_Selection()
{
    CPRj /* Cutting Path Ratio of j-th Cutting Plane with i-th Tool */
    First Tool Ratio ≤ CPRj
    CPRj ≤ Last Tool Ratio
}
Tool_Path_Generation()
{
    First_Tool()
    Zigzag Tool Path
    IF( CPRj ≥ Last Tool Ratio )
        End_Flag = TRUE
}
Other_Tool()
{
    IF( !End_Flag )
    {
        Spiral Tool Path
        IF( CPRj ≥ Last Tool Ratio )
            End_Flag = TRUE
    }
}
}
}

```

Fig. 7 Overall structure of rough cutting algorithm

게 된다.

(단계 5) 만일 선정된 공구가 더 있다면 단계 4의 과정을 반복하면서 각 절삭면에 대한 공구경로를 계속 추가하게 되며, 모든 공구에 대한 경로가 생성되면, 황삭가공은 끝나게 된다.

이상에서 자동으로 공구를 선정하고, 선정된 각각의 공구들에 대한 경로를 생성하는 황삭가공 알고리즘을 살펴 보았는데, Fig. 7은 가상언어로 이를 간략하게 나타낸 것이다.

한편, 본 황삭가공 알고리즘에는 다음과 같은 두가지 의문이 있을 수 있다.

첫째는, 모든 가공이 끝났음에도 정의된 모든 절삭면들 중에는 End-flag가 참이 아닌 것도 있을 수 있다는 것인데, 이는 프로파일들 중 극히 일부가 복잡한 형상을 갖는 경우이다. 이러한 일부 프로파일의 정밀도를 향상시키기 위해 공구가 추가 선정된다면, 2.2절에서 설명된 바와 같이 전반적으로 NC가공을 비효율적으로 만들게 된다. 따라서 이러한 비효율성을 배제하기 위해 일부 절삭면들로 인한 공구의 추가 선정은 없도록 하겠는데, 일반적으로 이러한 절삭면은 가공곡면의 밑부분에서 발생하며, 황삭과정에서는 가공할 수 없으므로 정삭과정에서 가공되도록 한다.

둘째는, 프로파일의 지그재그 가공 알고리즘이 적용되어야 할 절삭면은 반드시 첫번째 공구에 의해 정의되는 절삭면만이 아니라는 것이다. 두번째 공구 이상의 경로 생성과정에서도 새로 정의되는 절삭면이 이미 정의된 절삭면들 중 가장 밑의 절삭면 보다 더 아래에 정의된다면, 이 절삭면의 프로파일 내부영역은 가공되지 않은 상태이므로 이 절삭면에 대해서도 프로파일의 지그재그 가공 알고리즘이 적용되어야 한다.

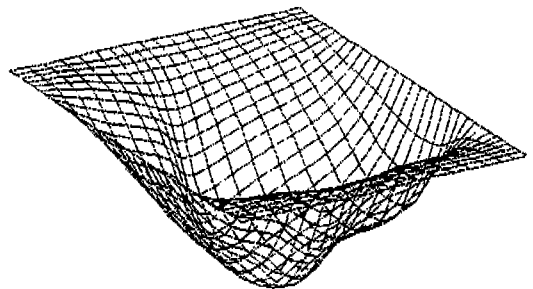


Fig. 8 Example surface model

5. 적용 예

본 연구에서 제시한 황삭가공 알고리즘을 Fig. 8의 137mm×170mm×75mm크기를 갖는 자유곡면 형상의 모델에 실제로 적용시켜 보았다. 이 곡면모델은 서울대학교 CAD 연구실에서 개발한 곡면 모델러를 통해 모델링 되었으며, 자유곡면에 적합한 NURBS 곡면으로 생성되었다.

Fig. 9는 첫번째 공구를 선정하기 위하여 공구 데이터베이스의 i+1번째 공구(10R/12L)에 대한 첫번째 공구로서의 타당성을 검사하는 과정을 보이고 있다. 각 절삭평면에서의 가공경로비는 Table 2에 보고 되고 있는데, FirstToolRatio가 0.70일 때, i번째 공구(12R/13L)에 대해서는 5번째 경계 프로파일의 가공경로비가 FirstToolRatio보다 작아 첫번째 공구로서 부적절한 반면, i+1번째 공구인 경우에는 모든 경계 프로

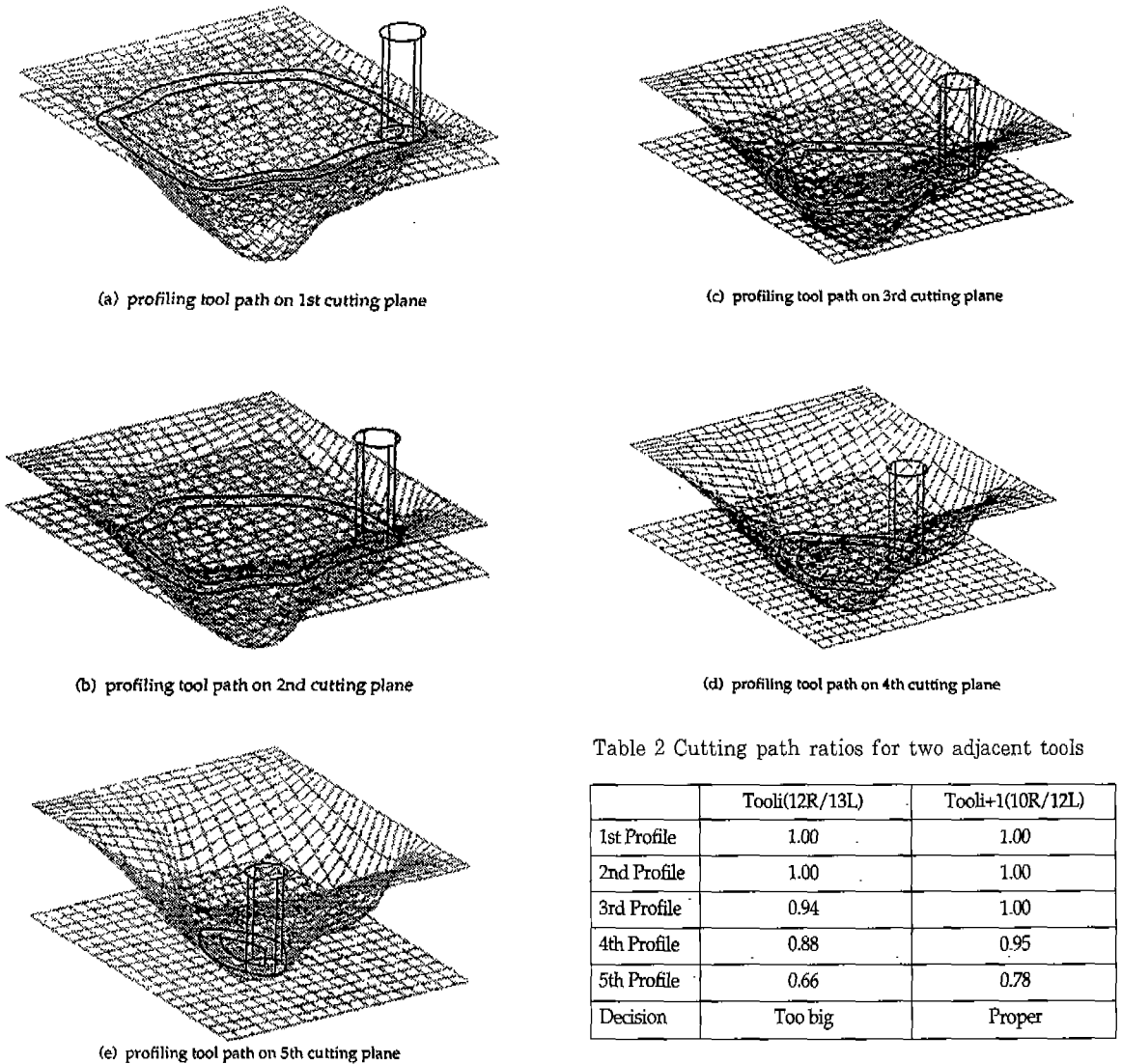


Table 2 Cutting path ratios for two adjacent tools

	Tool <sub>i</sub> (12R/13L)	Tool <sub>i+1</sub> (10R/12L)
1st Profile	1.00	1.00
2nd Profile	1.00	1.00
3rd Profile	0.94	1.00
4th Profile	0.88	0.95
5th Profile	0.66	0.78
Decision	Too big	Proper

Fig. 9 Cutting planes and the profiling tool paths of the first tool

파일들이 FirstToolRatio보다 큰 가공경로비를 갖게 되어 첫번째 공구로 선정된다는 것을 알 수 있다. 그리고 LastToolRatio가 0.95일 때, 처음 4개의 절삭평면 상의 경계 프로파일들은 LastToolRatio보다도 큰 가공경로비를 갖게 되어, 두번째 공구에 의해 가공될 때는 이 절삭평면들이 더 이상 가공되지 않는다. 그러나 다섯번째 절삭평면은 가공경로비가 LastToolRatio보다 작으므로 두번째 공구에 의해 추가로 가공된다.

Fig. 10은 가공 경로비가 가장 작은 다섯번째 프로파일을 검사 프로파일로 하여 두번째 공구(5R/6L)의 가공경로비를 구하는 모습인데, 가공경로비가 1이 되어 이 곡면모델의 황삭가공을 위한 공구로는 모두 2개가 선정되었다.

Fig. 11은 선정된 공구들에 대한 경로를 생성하는 절차를 설명하고 있는데, 먼저 첫번째 공구의 지그재그 경로는 실선으로 나타나는 5개의 절삭평면 상에서 구해 지게 되며, 두번째 공구의 나선형 경로는 점선으로 그려진 5개의 절삭평면과 10번째의 절삭평면 상에서 구하

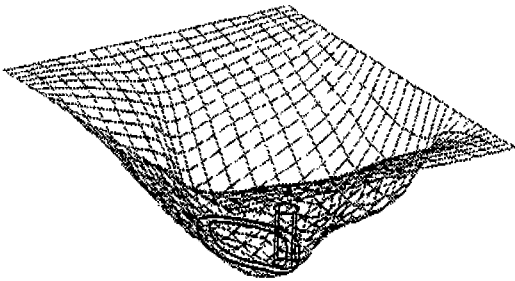


Fig. 10 The profiling tool paths of the second tool on 5th cutting plane

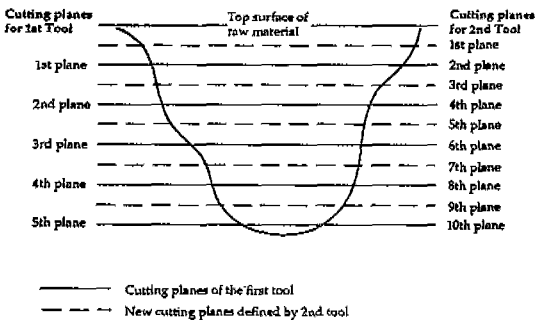


Fig. 11 Cutting planes defined by cutting tools

게 된다. 이때 첫번째 공구에 의해 정의된 절삭평면 중 위의 4개의 절삭평면에 대해서는 앞에서 언급했듯이 두번째 공구의 가공시 통과하게 된다. Fig. 12는 첫번째 공구에 의해 생성되는 첫번째 절삭평면 상의 지그재그 경로를 보이고 있다. Fig. 13은 두번째 공구에 의해 생성되는 나선형 경로들을 보이고 있는데, (a)는 두번째 공구에 의해 새로 정의된 절삭평면에 대한 경로이고, (b)는 첫번째 공구에 의해 정의된 절삭평면에 대한 경로로서 첫번째 공구에 의해 가공되지 않은 부분만을 가공하게 된다. Fig. 14는 실제 가공을 위해 시스템에 의해 제공되는 APT데이터의 일부를 보여주고 있다.

### 6. 맺음말

본 연구에서는 자유곡면의 금형제작을 위한 NC 가공 과정에 있어서 가공체적의 대부분이 제거되는, 즉 효율적인 NC 가공의 기본이 되는 효율적인 황삭가공에 관한 공구선정 및 공구경로 생성 알고리즘을 제시하였다.

이는 프로파일의 옅셈에 의해 생성되는 정방향루프와 역방향루프로부터 전 경로에 대한 실제 가공경로의 비, 즉 공구의 가공경로비가 FirstToolRatio 보다 크게 될 때 첫번째 공구로 선정되며, 이 공구로써 모든 절삭평면에 정의된 프로파일 내부영역을 가공하고, 첫번째 공구로 가공할 수 없는 프로파일의 복잡한 형상의 영역만을 보다 작은 공구로 가공하여 효율적인 가공이 되도록 하였다. 그리고 각 절삭평면은 공구경로가 새로 추가될

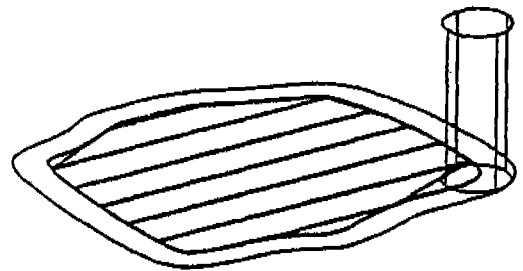


Fig. 12 Zigzag tool paths of the second tool

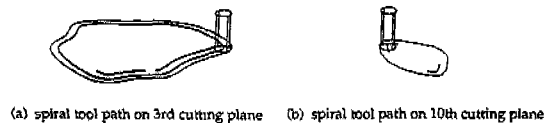


Fig. 13 Spiral tool paths of the second tool

APT DATA GENERATED ON Fri Jan 7 12:19:58 1994  
 MODEL/ model 100  
 TOOL 0/ (Radius : 10.0 mm)  
 TOOL 1/ (Radius : 5.0 mm)

DRILL/	10.00000,	-10.00000	0.00000		
/ TOOL	0(Radius : 10.0, Length : 12.0)				
/ FEED	100.00 (ipm)				
/ SPINDLE	1000.00 (rpm)				
/ RAPID					
GOTO/	10.00000,	-10.00000,	10.0000	PT	1
/ STEPDOWN					
GOTO/	10.00000,	-10.00000,	1.50580	PT	2
/ ZIGZAG CUTTING					
GOTO/	-20.60554,	-54.06054,	1.50580	PT	3
GOTO/	25.82686,	-54.06054,	1.50580	PT	4
GOTO/	61.49612,	-39.06054,	1.50580	PT	5
GOTO/	-43.36263,	-39.06054,	1.50580	PT	6
GOTO/	-43.62893,	-24.06054,	1.50580	PT	7
GOTO/	61.72718,	-24.06054,	1.50580	PT	8
GOTO/	60.86950,	-9.06054,	1.50580	PT	9
GOTO/	-43.21729,	-9.06054,	1.50580	PT	10
GOTO/	-42.07173,	5.93946,	1.50580	PT	11
GOTO/	58.17799,	5.93946,	1.50580	PT	12
GOTO/	53.02931,	20.93946,	1.50580	PT	13
GOTO/	-39.78746,	20.93946,	1.50580	PT	14
GOTO/	-10.27864,	35.93946,	1.50580	PT	15
GOTO/	21.08417,	35.93946,	1.50580	PT	16
/ RAPID	10.00000,	-10.00000,	1.50580	PT	17
GOTO/	56.09667,	-50.99668,	1.50580	PT	18
GOTO/	54.13400,	-51.91340,	1.50580	PT	19
GOTO/	51.74393,	-52.47614,	1.50580	PT	20
GOTO/	48.36452,	-52.75005,	1.50580	PT	21
GOTO/	44.36977,	-52.78571,	1.50580	PT	22
GOTO/	39.98767,	-52.76488,	1.50579	PT	23
GOTO/	35.14112,	-52.87347,	1.50579	PT	24
GOTO/	30.00748,	-53.31090,	1.50579	PT	25
GOTO/	24.73256,	-54.25676,	1.50579	PT	26
GOTO/	19.70520,	-55.77017,	1.50580	PT	27
GOTO/	15.15589,	-57.55326,	1.50580	PT	28
GOTO/	11.30722,	-59.09925,	1.50580	PT	29
GOTO/	7.82808,	-60.29135,	1.50580	PT	30
GOTO/	4.52101,	-61.12234,	1.50579	PT	31
GOTO/	1.37884,	-61.55320,	1.50580	PT	32
GOTO/	-0.67037,	-61.45804,	1.50580	PT	33
GOTO/	-2.09149,	-61.04328,	1.50579	PT	34
GOTO/	-5.50451,	-59.24834,	1.50580	PT	35
GOTO/	-10.23895,	-56.73497,	1.50580	PT	36
GOTO/	-15.51472,	-54.97158,	1.50580	PT	37
GOTO/	-21.04011,	-53.98277,	1.50579	PT	38
GOTO/	-26.07626,	-53.54330,	1.50579	PT	39
GOTO/	-30.43528,	-53.30435,	1.50579	PT	40
GOTO/	-34.31938,	-53.00426,	1.50579	PT	41
GOTO/	-37.54298,	-52.48086,	1.50579	PT	42
GOTO/	-40.01560,	-51.65268,	1.50579	PT	43
GOTO/	-40.76810,	-51.15267,	1.50580	PT	44
GOTO/	-41.41403,	-50.36187,	1.50580	PT	45
GOTO/	-42.18278,	-48.55037,	1.50580	PT	46
GOTO/	-42.82039,	-45.46311,	1.50580	PT	47
GOTO/	-43.20600,	-41.80537,	1.50579	PT	48
GOTO/	-43.43464,	-37.79862,	1.50579	PT	49
GOTO/	-43.55657,	-33.68883,	1.50580	PT	50
GOTO/	-43.61016,	-29.45685,	1.50580	PT	51
GOTO/	-43.63133,	-25.17501,	1.50579	PT	52

Fig. 14 APT data to cut example surface model

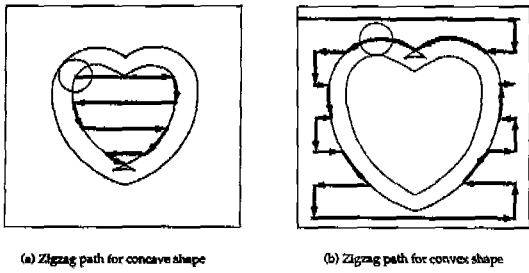


Fig. 15 Comparison of Tool Path between 2 Shapes

때마다 가공경로비를 구해보고 이것이 사용자가 지정한 가공정밀도, 즉 LastToolRatio 보다 커지게 되면, 다음 공구들에 대한 경로 생성시 이 질삭면은 더 이상 가공되지 않도록 하였다. 또한 다각형 프로파일의 내부영역을 가공하는 공구경로는 기존의 곡선 읍셋이나 다각형 읍셋을 이용하지 않고 지그재그 가공방법을 이용하여 곡선 읍셋이나 다각형 읍셋의 많은 문제점들을 해결하였다.

그리고 본 논문은 오목한 형상만을 고려하고 있으나, 볼록한 형상에 대해서도 같은 알고리즘이 적용될 수 있다. 즉, Fig. 15에서 볼 수 있듯이 볼록한 형상의 가공은 프로파일의 외부영역을 가공하는 것이므로, 프로파일을 바깥쪽으로 읍셋하여 경계다각형을 구하게 된다. 일단 경계 다각형이 구해지면, 이어지는 가공경로비의 계산, 일련의 공구선정, 그리고 경로생성 과정도 오목한 형상의 가공과 동일하다. 따라서 본 논문의 알고리즘은 볼록한 형상의 가공에도 그대로 적용될 수 있으며, 본문에서 살펴보았던 가공의 효율성도 모두 갖게 된다.

한편, 본 연구에서는 가공정밀도에 따라 공구선정에 필요한 FirstToolRatio와 LastToolRatio의 값을 직접 사용자가 입력하도록 하였는데, Table 1과 같은 시스템이 기본적으로 제안하는 값들은 임시적인 것으로 적절한 값들은 앞으로 실제 가공을 통해 찾아야 한다. 그리고, 사용자가 공구 데이터베이스를 구성함에 있어서 가공곡면의 형상을 고려하지 않아 모든 후보 공구들이 너무 크거나, 작게 되면 본 연구의 황삭 알고리즘은 효율적으로 적용될 수 없을 것이다. 이를 위하여 시스템에 의해 선정된 공구들을 사용자에게 보고하도록 하였는데, 사용자는 선정된 공구들이 적절치 않으면 새로운 공구 데이터베이스를 구성하여 새로운 공구들이 선

정되도록 한다.

본 연구에서 제안된 황삭가공의 특징 중의 하나인 여러 개의 공구 사용은 공구교환의 문제를 갖게 되나, 대부분의 NC 공작기계는 자동 공구교환 기능을 갖추고 있기 때문에 큰 문제는 아니라 본다.

마지막으로 본 연구의 목적인 효율적인 NC 밀링가공을 위해서는 황삭가공, 중삭가공, 정삭가공이 서로 연관성을 갖으면서, 다음 가공과정에 필요한 조건들이 만족되도록 가공하는 NC 가공에 관한 광범위한 연구가 수행되어야 할 것이다.

### 참고문헌

1. Y.S. Suh and K. Lee, 1990, "NC Milling Tool Path Generation for Arbitrary Pockets Defined by Sculptured Surfaces", Computer Aided Design, Vol.22, No.5, pp.273-284.
2. 최 재석, 1992, "NC 밀링 가공 시스템 개발에 관한 연구", 석사학위논문, 서울대학교 대학원 기계설계학과.
3. Robert B. Jerard, et. al, 1989, "Methods for Detecting Errors in Numerically Controlled Machining Sculptured Surface", IEEE CG&A, Vol.22, No.1, pp.26-39.
4. B.K. Choi and C.S. Jun 1989, "Ball-end Cutter Interference Avoidance in NC Machining of Sculptured Surface", Computer Aided Design, Vol.21, No.6, pp.371~378.
5. Yoshmi, et.al., 1990, "5-Axis Control Machining Based on Solid Modeler", JSPE, pp.111~116.
6. Y.Takeuchi, et.al., 1989, "Development of a Personal CAD/CAM System for Mold Manufacture Based on Solid Modeling Techniques", Annals of the CIRP, Vol.38, pp.429~432.
7. "Rough to Depth", 1990, Unigraphics I, Manufacturing operation, Vol.2, Chap. 26.
8. "CATIA Numerical Control-Mill", 1988,

Dassault Systems.

9. Y.S. Lee and T.C. Chang, 1991, "CASCAM-An Automated System for Sculptured Surface Cavity Machining", *Computers in Industry*, Vol.16, pp.321~342.
10. G. Catania, 1992, "A computer-aided prototype system for NC rough milling of freeform shaped mechanical part-pieces", *Computers in Industry*, Vol.20, pp.275~293.
11. K. Lee, T.J. Kim, and S.E. Hong, 1994, "Generation of tool path with selection of proper tools for rough cutting process", *Computer Aided Design*, Vol.26, No.11.
12. W. Tiller, 1983, "Rational B-spline Curve and Surface Representation", *IEEE CG & A*, pp.61~69.
13. H. Persson, 1978, "NC machining of arbitrary shaped pockets", *Computer Aided Design*, Vol.10, No.3, pp.169~174.
14. I.G. Gosling, 1991, "GENERATION OF HIGH SPEED TOOL PATHS WITH COLLISION AVOIDANCE", *Proc. World Scientific, Singapore, October 2-4*, pp.245~248.