

포켓형상가공을 위한 최적공구 선정방법

경 영 민*, 조 규 갑*, 전 차 수**

An Optimal Tool Selection Method for Pocket Machining

Young-Min Kyoung*, Kyu-Kab Cho*, Cha-Soo Jun**

ABSTRACT

In process planning for pocket machining, the selection of tool size, tool path, overlap distance, and the calculation of machining time are very important factors to obtain the optimal process planning result. Among those factors, the tool size is the most important one because the others depend on tool size. And also, it is not easy to determine the optimal tool size even though the shape of pocket is simple. Therefore, the optimal selection of tool size is the most essential task in process planning for machining a pocket. This paper presents a method for selecting optimal tools in pocket machining. The branch and bound method is applied to select the optimal tools which minimize the machining time by using the range of feasible tools and the breadth-first search.

Key Words: Tool Selection(공구선정), Pocket Machining(포켓가공), Branch and Bound Method(분기한계법).

1. 서론

포켓(pocket)형상의 가공은 임의의 형태를 취하는 윤곽선 내부에 있는 피삭재를 제거하여 원하는 형상을 얻는 절삭가공방식으로, 금형부품에서 포켓가공은 중요한 가공공정의 하나이다. 일반적으로 포켓형상은 플랫 엔드밀(flat endmill), 볼 엔드밀(ball endmill) 및 필렛 엔드밀(filleted endmill) 등의 공구를 사용하여 가공되며, 가공방법은 오프셋 밀링(offset milling) 또는 지그재그 밀링(zigzag milling)에 의해 이루어진다. 또한 포켓가공을 위한 공정설계에 있어서 공구크기의 설정, 공구경로의

결정, 각 공구경로에 대한 절삭폭 및 포켓가공에 소요되는 절삭시간의 추정 등이 주된 결정사항으로, 공구크기를 제외한 나머지 요소들은 공구의 크기에 의존하므로 공구 크기의 결정이 포켓형상의 가공에 있어서 가장 중요한 요소가 된다고 할 수 있다.

임의의 형상의 포켓을 가공하기 위한 절삭공구의 선정에 관한 문제는 포켓가공이 실제 생산현장에서 차지하는 중요도에 비해 그다지 많은 연구가 되어 있지 않고, 현재 몇 가지의 연구결과가 발표되어 있을 뿐이다. Yamazaki 등⁽¹⁾은 가용한 공구의 데이터베이스로부터 공구 및 공구 홀더와 공작물의 충돌이 발생하지 않는 최대직경 및 최대

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터, 기계기술연구소, 산업공학과
 ** 경상대학교 산업공학과

길이를 가지는 공구를 선정하여 가공을 완료한 다음, 미가공부는 방전가공으로 처리하는 방법을 제안하였다.

Lee 등⁽²⁾은 Spatial Occupancy Enumeration에 의해 가공대상체적을 octant로 분할하고 공구의 접근가능성을 고려하여 full octants에 대응하는 최대직경의 가공공구를 1차 가공용 공구로, 미가공영역에 대해서는 octant로 계속해서 분할하여 포켓형상을 완전히 가공할 수 있는 공구직경을 구해 그것을 잔삭용 공구로 선정하였으며, 하나의 가능한 공구조합을 제공한다.

Held⁽³⁾는 포켓가공에 사용할 크기가 다른 두 개의 공구, 즉 컨투어 밀링을 위한 첫번째 공구와 포켓의 '내부'를 가공하기 위한 두번째 공구를 선정하는 문제를 다루었다. 포켓에 존재하는 간극(straits) 중에서 최소의 폭을 첫번째 공구크기의 상한으로 설정하였으며, 포켓윤곽선에 원호가 포함되어 있는 경우에는 각 원호를 적절히 가공할 수 있을 정도로 공구가 충분히 작아야 한다는 조건을 설정하였다. 미가공부의 발생을 방지하기 위해 포켓의 각 코너에 대해 공구경로간의 거리가 최대가능한 공구반경과 같다고 두고 얻어진 국부적으로 허용가능한 공구반경의 집합 중에서 최소값을 두번째 공구크기의 상한으로 설정하였다.

Bala 등⁽⁴⁾은 포켓가공을 위한 공구로 정삭용 공구와 황삭용 공구를 선정하는 방법을 제안하였다. 이 방법에서는 먼저 포켓의 모든 볼록정점(convex vertex)에서의 필렛반경(fillet radius) r 이 동일하다고 가정하고 이 크기에 해당하는 공구를 정삭용 공구로 선정하였다. 또한 황삭용 공구의 경우에는 볼록정점에서는 필렛원 또는 절원의 반경(포켓형상의 임의의 변 또는 아일랜드(island)를 침범하지 않을 것)을 구하고, 리플렉스 정점(reflex vertex)에서는 마주보는 변 또는 다른 리플렉스 정점에 대한 수직거리 중에서 최소값을 구하여, 이 중에서 작은 것을 공구반경으로 설정하였다. 이 방법은 포켓형상에 따라서 황삭용 공구의 크기가 정삭용 공구보다 작거나 또는 크더라도 별로 차이가 없어 정삭용 및 황삭용 공구의 구분이 무의미하게 될 수 있다.

Lee 등⁽⁵⁾은 3차원 포켓의 가공시간을 최소화하는 최적의 공구를 구하기 위해 포켓을 여러 개의 절삭평면으로 구분하여 각 절삭평면에 대해 대부분의 재료를 제거할 수 있는 대형 공구를 황삭용 공구로 선정하고, 중삭용 공구로는 마무리 공차만 남기고 플랫 엔드밀에 의한 가공 후에 형성되는 부품표면 상의 솔더(shoulder)를 제거하기 위한 공구를 선정하며, 다면체의 각진 표면을 갖는 부품

표면의 마무리용 소형공구를 정삭용 공구로 선정하였다. 이 방법에서는 MRR(Material Removal Rate)이 공구의 크기에 의존하며 기하학적인 제약 하에서 가능한 한 큰 공구를 선택하는 것이 유리하다는 데에 근거를 두고 있다.

이상의 연구에 의해 포켓가공을 위한 공구선정문제가 다루어졌으나, 최적의 공구조합을 제공하는 데에는 문제가 있다. 또한 공구경로의 최적화 문제를 다룬 다른 연구들⁽⁶⁻⁹⁾에서도 공구의 크기에 대해 최적화가 이루어지지 않고 공구크기와 공구조합의 결정에 관한 기준이 제시되어 있지 않아 공구의 선택에 문제가 존재한다. 실제로 공구의 경로는 공구의 크기에 의존하므로 공구경로의 결정에 앞서 공구의 최적 크기에 관한 결정이 선행되어야 하며, 결정된 공구크기에 따라 공구경로의 최적화가 수행되어야 하는 것이 필수적이다.

본 연구에서는 일반적인 형상을 가지는 포켓가공에 있어서 가공시간을 최소화하는 최적공구의 크기 및 공구조합의 선정방법에 대해서 논의하고자 한다.

2. 공구 크기 및 공구조합의 결정

2.1 포켓가공에서 공구선정문제의 정의

일반적인 3차원 포켓형상은 여러 개의 겹쳐져 있는 절삭평면에 대한 플랫 엔드밀에 의한 3차원 황삭밀링가공과 포켓의 윤곽을 따르는 볼 엔드밀에 의한 3차원 정삭밀링가공에 의해 가공이 이루어진다. 또한, 3차원 황삭가공은 Fig. 1에 보인 바와 같이 다수의 절삭평면에 대한 2차원 밀링가공의 반복공정으로 간주할 수 있다.

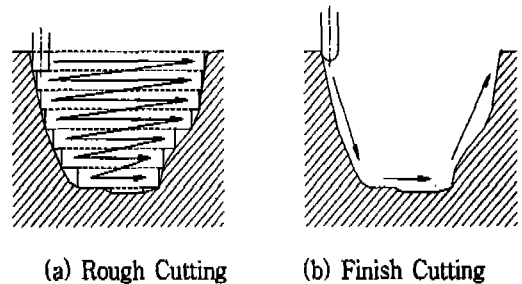


Fig. 1 Types of Pocket Machining

본 연구에서는 절삭공구를 사용하여 주어진 포켓형상을 완전히 가공할 수 있으며, 가공시에는 직경이 큰 공구부터 사용하되 그 공구로 가공이 가능한 부분은 모두 가공

한 후에 남은 미가공부에 대해서는 보다 작은 공구를 사용하여 잔여가공을 수행한다고 가정하고, 균일한 깊이를 가지는 포켓형상을 대상으로 가공시간을 최소화하는 최적공구의 조합을 효율적으로 선정할 수 있는 방법을 개발한다. 공구선정문제는 대안공구집합에서 최소가공시간을 주는 공구의 조합을 선택하는 이산형 조합문제(discrete combinatorial problem)이며, 본 연구에서는 최적해를 찾기 위해 분기한계법(Branch and Bound method)을 사용한다.

2.2 공구크기의 범위

주어진 포켓형상에 대하여 다음과 같이 가공을 위한 이론적인 공구크기의 범위를 구할 수 있다. 이론적인 공구크기는 작업장에 갖추어져 있는 가용공구에 의해 제한을 받으며, 이를 고려하여 실제 절삭가공에 사용가능한 공구크기의 범위를 구할 수 있다.

(1) 공구의 최소크기

포켓가공을 위한 공구의 최소크기는 포켓형상의 윤곽선을 따라 이동하면서 윤곽선 내부의 모든 영역에 접근할 수 있는 허용가능한 최대 크기의 공구로 결정한다. 즉, 최소 크기의 공구는 포켓형상의 윤곽선을 따라 일주할 수 있어야 하며, 이것은 폭이 좁은 간극이 포켓형상에 존재하는 경우, 이 부분을 가공 도중에 공구가 지나갈 수 있어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 공구의 최소크기 결정에 관여하는 요소는 볼록정점에 지정되는 라운드 반경, 오목정점에서 마주보는 변까지의 수선의 길이 및 한 오목정점과 다른 오목정점과의 직선거리이다. 임의의 한 정점에서 허용가능한 공구의 최대크기를 모든 정점에 대해 구하고, 이들 중에서 최소인 것을 최소크기의 공구로 결정하며, 따라서 최소공구의 직경 $\phi(T^S)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi(T^S) = \min\{2r_i, w_j\} \tag{1}$$

r_i : round radius at convex vertex i
 w_j : strait width at concave vertex j
 where, v_c : number of convex vertices
 v_v : number of concave vertices
 $i: 1, 2, \dots, v_c$; $j: 1, 2, \dots, v_v$

(2) 공구의 최대크기

포켓가공을 위한 공구의 최대크기는 포켓형상의 윤곽선을 대상으로 오프셋라인(offset line)을 형성하여 이 라인이 가장 나중에 소멸되는 지점에서 얻어지며, 이 최대을

셋거리(maximum offset distance)를 공구의 최대크기로 결정한다. 공구의 최대직경 $\phi(T^L)$ 은 다음과 같다.

$$\phi(T^L) = \max\{2D_i\} \tag{2}$$

where, D_i : offset distance of i offset line

(3) 가능한 공구크기의 범위

실제의 절삭가공에 사용할 가능한 공구직경 $\phi(T^F)$ 의 범위는 다음과 같다.

$$\phi(T^S) \leq \phi(T^F) \leq \phi(T^L) \tag{3}$$

작업장에 준비되어 있는 가용한 공구의 수를 n , 식 (3)을 만족하는 공구의 수를 m 이라고 하면, $m \leq n$ 이 되며 이때의 m 이 포켓가공을 위한 후보공구(candidate tools)의 수가 된다. 즉, $S(T)$ 를 후보공구들의 집합이라고 하면,

$$S(T) = \{T_1, T_2, T_3, \dots, T_m\} \tag{4}$$

where, $\phi(T_{i-1}) \leq \phi(T_i)$ for $i = 2, 3, \dots, m$

로 표현되며, 여기서 최소공구 T_1 은 공구 DB 내의 가용공구 중에서 $\phi(T_1) \leq \phi(T^S)$ 를 만족하는 최대직경의 공구를 나타낸다.

2.3 분기한계법에 의한 최적공구조합의 결정

실제 절삭가공에 사용할 수 있는 대안공구집합 $S(T)$ 는 크기가 증가하는 순서로 나열되며, 이 중 최소공구는 주어진 포켓형상의 기계가공을 완성하기 위해서는 항상 필요하므로 최적공구조합에 반드시 포함되어야 한다.

최적공구조합을 결정하는 데에 분기한계법을 적용하기 위해 Fig. 2와 같은 공구조합트리(tool combination tree)를 고려한다. 레벨 0의 루트노드(root node)를 시



Fig. 2 Tool Combination Tree

작점으로 하여, 레벨 i 는 어느 공구를 i 번째 공구로 사용할 것인지 선택하는 것을 의미한다.

레벨 1의 ' T_1 ' 노드는 포켓가공에 공구 T_1 만을 단독사용하여 가공을 완성하는 경우를 의미하며, ' T_2 ' 노드는 공구 T_2 를 첫번째 공구로 사용하여 최대한의 가공을 수행한 다음, 공구 T_1 을 마지막 공구로 사용하여 포켓형상을 완성하는 경우를 의미한다. 즉, 레벨 1에 있는 임의의 공구를 첫번째 공구로 사용하여, 하위레벨에 있는 보다 작은 직경의 공구를 포함하여 공구 T_1 을 마지막 공구로 사용함으로써 가공을 완성할 수 있는 공구조합을 얻게 되며, 마지막 공구 T_1 에 이르는 경로는 하나의 대안공구조합을 형성한다.

Fig. 2의 공구조합트리에서 최상위 레벨에 위치한 노드로부터 분기(branching)과정을 수행하며, 이 때 각 노드에서의 현재가공시간(current machining time)을 하계(lower bound)로 하여 바운딩(bounding)함으로써 최소가공시간을 주는 최적공구조합을 구하며, 그 과정을 흐름도로 나타내면 Fig. 3과 같다.

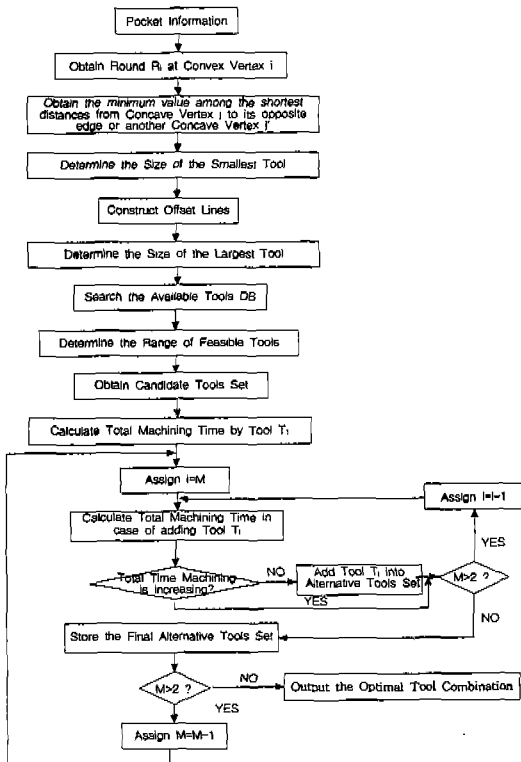


Fig. 3 Flowchart for Selecting the Optimal Tool Combination

3. 공구경로의 계산

일반적으로 밀링가공에 있어서는 언더컷을 방지하기 위해 다운밀링(down milling) 방법을 사용한다. 본 연구에서 고려하는 포켓가공의 절삭형태는 나선형 절삭(spiral cutting) 방법을 취하며, 보통 절삭공구는 시계방향으로 회전하므로 공구이동방향은 반시계방향으로 한다. 또한 포켓형상의 내부에서 가공이 시작되어 점차 바깥으로 전개되는 형태로 절삭이 이루어진다.

먼저 현재 사용할 공구에 적합하고 포켓형상의 외부윤곽선으로부터 내부에 이르는 '가상의 공구경로'를 얻은 다음, 이 경로의 방향을 반대로 한 것을 실제의 가공경로로 설정한다.

3.1 가상의 공구경로

가상의 공구경로 형성에 있어서 현재 선정된 공구의 시작점은 이 공구가 접근가능한 임의의 점점으로 설정되며, 또한 이 경로는 포켓의 윤곽선을 따라 시계방향으로 이동하면서 형성된다.

현재 선정된 공구의 첫번째 킨투어링(contouring)을 위한 공구경로는 포켓형상의 윤곽선으로부터 공구반경만큼 떨어진 읍셋라인을 따라 형성된다. 두번째 이후의 킨투어링에 의한 가공대상은 실제 가공시 이전의 가공부여 어느 정도 중첩되도록 형성된다. 즉, 공구의 읍셋거리(offset distance)를 d 라고 하고, 공구직경을 ϕ 라고 하면, 이전의 공구경로로부터 다음 공구경로까지의 읍셋거리는 일반적으로 $d < \phi$ 의 관계를 가진다.

또한 바깥쪽 읍셋라인의 종료점으로부터 그 바로 안쪽의 읍셋라인의 시작점으로 공구가 이동할 때에는 Fig. 4 (a)와 같이 읍셋라인이 두 직선이 교차하는 코너인 경우에는 두 직선의 사이각의 2등분 방향으로 설정되며, Fig. 4 (b)와 같이 읍셋라인이 자유곡선인 경우에는 법선방향으로

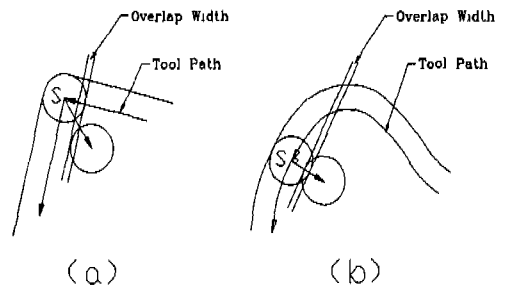


Fig. 4 Tool Movement between Two Adjacent Tool Paths

로 설정된다.

인접한 임의의 두 공구경로에 대한 오버랩거리(d), 바깥쪽 공구경로에 의한 가공부와 안쪽 공구경로에 의한 가공부와 오버랩폭(overlap width, d_{ov}) 및 바깥쪽 공구경로의 종료점으로부터 안쪽 공구경로의 시작점까지의 공구이동거리(d_i)는 공구의 직경과 가공부의 윤곽선의 형상에 대한 기하학적인 해석으로부터 결정된다.

임의의 공구의 절삭에 의해 형성되는 가공부의 윤곽선(inner contour line) 형상은 외부윤곽선(outer contour line)과 공구직경간의 관계로부터 결정된다. 외부윤곽선이 직선과 원호로 이루어진 경우, 가공부의 윤곽선은 직선과 원호 및 직선과 직선으로 구성될 수 있다. 외부윤곽선의 원호의 반경을 r_o , 공구의 직경을 ϕ_T 라고 표시하면, $\phi_T \geq r_o$ 일 때에는 가공부의 윤곽선이 직선과 직선으로 구성되고, $\phi_T < r_o$ 일 때에는 직선과 원호로 이루어지며, 이것을 도식화하여 나타내면 Fig. 5 와 같다.

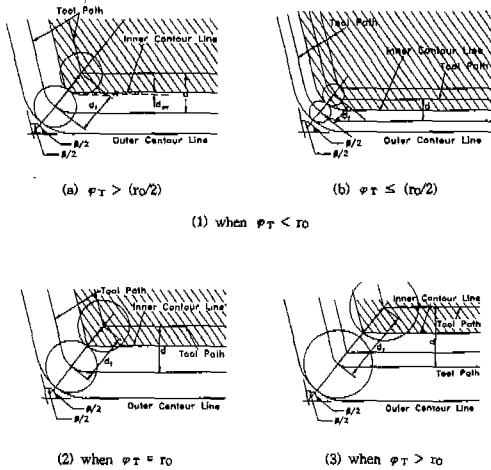


Fig. 5 Relations between Tool Diameter and Shape of Contour Line(the combination of straight lines, and straight line and circular arc)

Fig. 5 에 주어진 각각의 경우에 대한 d_i , d_{ov} 및 d 의 관계식은 기하학적인 해석에 의해 구할 수 있으며, 그 결과를 Table 1에 나타내었다.

또한 외부윤곽선이 원호와 원호로 이루어진 경우에는 가공부의 윤곽선이 원호와 원호로 구성된다. 외부윤곽선의 원호의 반경을 r_o , 공구의 직경을 ϕ_T 라고 표시하면 이들간의 관계에 따라 가공부의 윤곽선은 Fig. 6 에 예시

Table 1 Resulted Equations of d_i , d_{ov} 및 d for the cases given in Fig. 5

when $\phi_T < r_o$	$\phi_T \leq (r_o/2)$	d_i	ϕ_T
		d_{ov}	0
	$\phi_T > (r_o/2)$	d_i	ϕ_T
		d_{ov}	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 - \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$
	d	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 + \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$	
when $\phi_T = r_o$		d_i	ϕ_T
		d_{ov}	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 - \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$
		d	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 + \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$
when $\phi_T > r_o$		d_i	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 + \frac{1}{\cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right)} \right\}$
		d_{ov}	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 - \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$
		d	$\frac{\phi_T}{2} \left\{ 1 + \cos \left(90^\circ - \frac{\phi_T}{2} \right) \right\}$

한 형상으로 이루어진다. 그림에서 빗금친 부분의 윤곽선이 가공부 윤곽선을 나타내며, 각각의 경우에 대한 d_i , d_{ov} 및 d 의 관계식은 기하학적인 해석으로부터 결정할 수 있다.

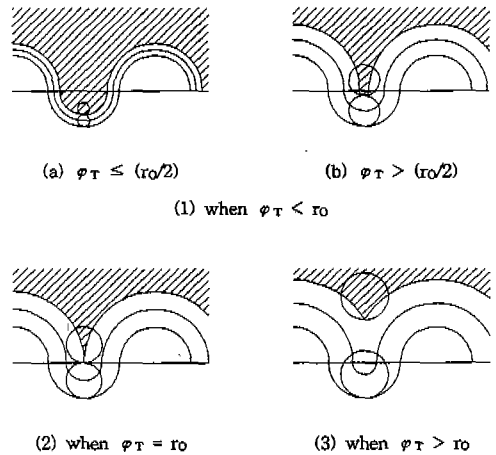


Fig. 6 Relations between Tool Diameter and Shape of Contour Line(the combination of circular arcs)

Fig. 6(1-b)의 경우에 대해 살펴보면, 가공부 윤곽선을 구성하는 두 원호의 반경을 각각 r_1 과 r_2 라고 할 때 미가공부는 Fig. 7과 같이 빗금친 부분에 해당한다. 공구는 바깥쪽 공구경로의 종료점 O로부터 안쪽 공구경로의 시작점 O'로 이동하며, 이 점에서 가공부 윤곽선에 대해 접선을 그었을 때 이 두 접선의 사이각을 α 라고 표시한다. 이 때, 수선의 길이를 공구반경에서 뺀 값이 오버랩폭이

되고, 기하학적인 관계로부터 다음 식을 얻는다.

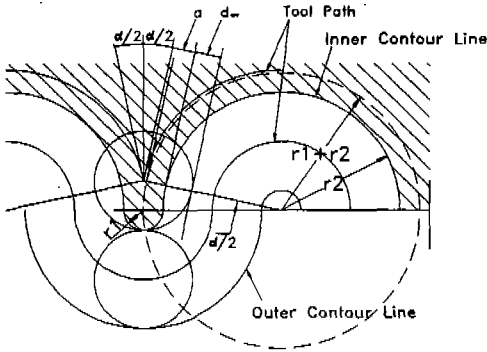


Fig. 7 Case of the Combination of Circular Arcs

$$d_i = \phi_T \quad (5)$$

$$d_{ov} = \frac{\phi_T}{2} - \frac{r_1 - [\cos(\alpha/2) - 1]r_2}{\cos(\alpha/2)} \quad (6)$$

$$d = \frac{\phi_T}{2} + \frac{r_1 - [\cos(\alpha/2) - 1]r_2}{\cos(\alpha/2)} \quad (7)$$

그리고 직선과 원호 또는 원호와 원호가 서로 접하면서 만나지 않는 경우에는 라운드가 지정되지 않으며, 아무리 작은 공구를 사용하더라도 절삭공구로 가공이 완성될 수 없으므로 본 연구의 범위에서는 제외된다. 그러나 원호와 원호가 접하는 경우와 유사한 방법을 이용하면 d_i , d_{ov} 및 d 의 식을 구할 수 있다.

최초의 컨투어링이 완료된 다음에는 움푹 거리만큼 포켓의 내부로 이동하여 다음의 컨투어링을 실시하며, 포켓의 내부가 완전히 제거될 때까지 이 과정을 수행한다. 이때, 일단 가상의 공구경로를 따라 일주한 후에는 현재의 공구경로를 공구반경만큼 포켓의 내부로 움푹하여 미가공부가 존재하는지를 체크할 필요가 있다. 즉, 공구반경만큼 움푹된 이 윤곽선은 현재의 공구경로에 의해 가공이 이루어지지 않고 남게 되는 미가공부의 윤곽을 나타내는 것으로, 이것을 '미가공부의 윤곽선'이라고 부르기로 한다. 이 미가공부의 윤곽선이 가상의 공구경로와 동일한 방향(시계방향)이면 아직 미가공부가 존재함을 뜻하며, 가상의 공구경로와 동일한 방향이 아니면(즉, 반시계방향

또는 시계방향과 반시계방향의 혼합) 현재의 공구경로에 의해 포켓가공이 완료됨을 뜻한다. Fig. 8 (a)는 미가공부가 남아 있는 경우를 나타내며, Fig. 8 (b)는 현재의 공구경로를 따른 절삭에 의해 포켓의 가공이 완료되는 경우를 나타낸다.

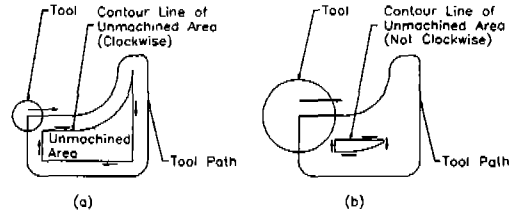


Fig. 8 Checking the Existence of Unmachined Area

후속가공이 필요한 미가공부 윤곽선은 점, 선, 스트립 또는 일반적인 형상의 아일랜드(island)의 형태로 존재할 수 있다. 첫째, 미가공부의 윤곽선이 점의 형태를 취하는 경우에는 이 점을 원점으로 하여 센터 드릴링(center drilling)을 수행한다. 둘째, 선의 형태를 취하는 경우에는 이 선을 공구경로로 하여 컨투어링을 수행한다. 셋째, 스트립(미가공부가 '띠'의 형상을 취하는 것으로, 윤곽선의 회전방향이 시계방향이며 그 폭이 공구의 1회 컨투어링으로 완성가공되는 형상)의 경우에는 움푹라인을 형성하여 다음 공구경로로 결정한다. 마지막으로, 일반적인 형상의 아일랜드는 후속하는 한 번의 컨투어링으로 가공이 완료되지 않는 형상을 의미하며, 이 때에는 움푹라인을 형성하여 다음 공구경로로 결정하고, 그 결과 생성되는 미가공부의 윤곽선에 따라 위의 절차를 반복 적용함으로써 가공방법이 결정된다.

3.2 가공 공구경로 및 총가공시간

실제 가공에 사용할 공구경로는 가상의 공구경로의 역방향으로 설정되며, 이 공구경로로부터 해당 공구 또는 공구조합에 따른 공구의 이동거리를 구한 다음, 각 공구에 대해 실험적으로 주어져 있는 적정 피이드율을 사용하여 총가공시간을 계산한다.

한편, 2개 이상의 공구가 조합되어 가공이 이루어지는 경우, 선행공구의 가공완료 이후에는 공구교환을 거쳐 후속공구가 사용된다. 이 때, 선행공구에 의해 포켓내부의 많은 부분이 제거되고, 이 공구가 접근할 수 없는 일부 영역에만 미가공부가 존재하게 된다. 특히, 정점에서 이러

한 상황이 발생하는 경우에는 이 부분을 가공하기 위한 후속공구의 이동횟수(number of passes)를 알아야 한다. 일반적으로, 정점을 이루는 두 직선의 사이각의 2등분 방향으로 미가공부의 두께가 최대이고, 이곳을 벗어날수록 그 폭이 감소하므로 후속공구의 이동횟수는 Fig. 9와 같이 점 d에서 대응하는 변에 내린 수선의 길이로부터 결정된다. 즉, Fig. 9(a)에서 공구 T를 사용하여 가공이 끝났을 때 미가공부의 영역은 빗금친 부분으로 나타나 있다. 점 d에서 대응하는 변에 수선을 내렸을 때 그 수선의 길이(l)는 정점을 이루는 두 직선의 사이각을 β , 공구 T의 직경을 ϕ_T 라고 표시하면,

$$l = \overline{dd_1} = \frac{\phi_T}{2} \{1 - \sin(\frac{\beta}{2})\}$$

가 된다. 후속공구를 T', 그 직경을 $\phi_{T'}$ 로 표시하면, 후속공구의 이동횟수는 l과 $\phi_{T'}$ 의 비로써 식 ⑧과 같이 구할 수 있다.

$$\# \text{ of pass} = \begin{cases} n, & \text{if } n : \text{integer} \\ \lfloor n+1 \rfloor, & \text{if } n : \text{real} \end{cases} \quad (8)$$

where, $n = \phi_{T'} / l$

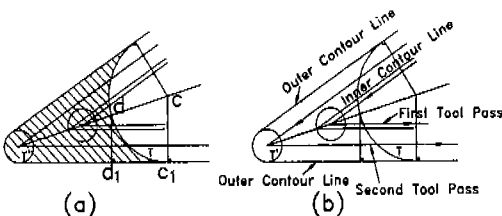


Fig. 9 Determination of the Number of Tool Passes

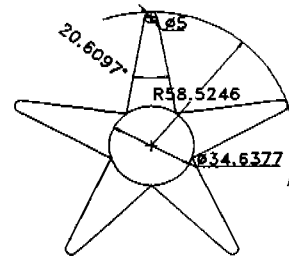
또한, Fig. 9(b)에 주어진 미가공부의 가공을 위한 공구경로를 나타내었다.

4. 적용사례

본 연구에서 제안한 공구선정 알고리즘의 적용예를 보기 위해 Fig. 10과 같이 직선 및 원호로 이루어진 별모양의 포켓형상을 고려한다.

(1) 공구의 최소 및 최대크기의 결정

Fig. 10에서 공구의 최소크기는 $\phi(T^S) = 5(\text{mm})$ 이고,



the range of diameter of the feasible tools = [5.0, 34.6377]

Fig. 10 Example Drawing

최대크기는 $\phi(T^L) = 34.6377(\text{mm})$ 이다. 여기서, 작업장에 비치되어 있는 가용공구의 종류가 $\{\phi 3, \phi 5, \phi 10, \phi 16, \phi 20, \phi 24, \phi 30, \phi 50\}$ 이라고 두면, 실제 절삭가공에 사용할 가능한 공구크기의 범위는

$$5 \leq \phi(T^F) \leq 34.6377$$

이 되며, 후보공구의 집합 $S(T)$ 는 다음과 같다.

$$S(T) = \{T_1, T_2, \dots, T_6\} = \{\phi 5, 10, 16, 20, 24, 30\}$$

그리고, 이에 대응하는 피이드율은 다음과 같다.

$$\text{Feedrate} = \{95, 132, 112, 95, 75, 65\} [\text{mm/min}]$$

주어진 피이드율은 일본 공구제작사인 OSG의 추천절삭 조건으로, 재질이 중탄소강인 2인 공구에 의해 슬롯형상을 가공할 때를 기준으로 한 것이다.

(2) 공구조합 및 가상의 공구경로의 계산

주어진 포켓의 가공에 사용할 수 있는 공구의 크기는 6가지로 결정되었다. 따라서 이들 공구를 사용하여 가공할 수 있는 공구의 조합은 Fig. 11과 같은 공구조합트리의 형태로 표현되며, 그 경우의 수는 32(개)이다. 이 중에서 최소공구인 T_1 만을 사용하여 가공을 완료하는 경우에 대해 공구조합의 결정 및 공구경로의 계산과정을 상세히 설명한다.

i) Fig. 12에서 S의 위치를 가상의 공구경로의 시작점이라고 임의로 설정한다.

ii) 이 위치에서 읍셋라인을 구성하는 두 직선의 사이각이 20.6097° 이므로 인접한 두 공구경로를 따른 절삭

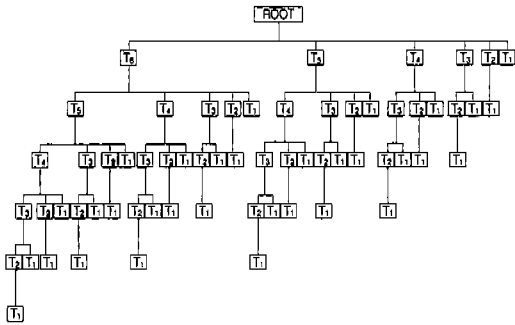


Fig. 11 Tool Combination Tree for the Example

에 의한 가공부간의 오버랩폭은

$$d_o = \frac{\phi}{2} \{1 - \cos(90^\circ - \frac{\beta}{2})\} = \frac{5}{2} \{1 - \cos 79.6951^\circ\} \approx 2.05[mm]$$

로 계산된다.

iii) 인접하는 두 공구경로간의 겹셋거리는

$$d = \frac{\phi}{2} \{1 + \cos(90^\circ - \frac{\beta}{2})\} = \frac{5}{2} \{1 + \cos 79.6951^\circ\} \approx 2.95[mm]$$

가 된다.

iv) 공구는 포켓의 윤곽선을 따라 일주를 완료하면 가공시작점으로 돌아오게 되며, 이 위치에서 거리 d 만큼 포켓 내부로 겹셋되어 다시 일주공하게 된다. 이 때, 바깥 공구경로의 가공종료점으로부터 앞에서 계산한 거리 d 만큼 겹셋된 안쪽 공구경로의 가공시작점까지의 공구 이동거리는 아래와 같다.

$$d_i = \frac{\phi}{2} \{1 + \frac{1}{\cos(90^\circ - \beta/2)}\} = \frac{5}{2} \{1 + \frac{1}{\cos 79.6951^\circ}\} \approx 16.475[mm]$$

공구 T_1 에 의한 가상의 공구경로는 포켓의 윤곽선을 따른 선회가공과 공구경로의 겹셋팅이 반복되어 이루어지며, 그 결과를 도식화하여 나타내면 Fig. 12와 같다. 따라서 실제의 가공에서는 Fig. 12에 표시된 가상의 공구경로를 따라 가장 안쪽에 위치한 공구경로의 종료점에서 시작하여 반시계방향으로 안쪽에서 바깥쪽으로 이 공구 경로를 역방향으로 따라가면서 수행된다.

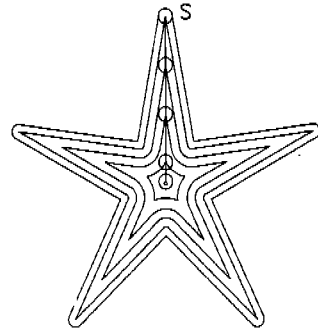


Fig. 12 Tool Paths for Tool T_1

(3) 공구의 이동거리 및 총가공시간의 계산

Fig. 10에 주어진 예제도면을 대상으로 하여 구한 모든 공구조합에 대한 총가공시간은 Table 2와 같다. 이 Table 에서 공구조합 '321'은 공구 T_3 을 첫번째 공구로, 공구 T_2 '를 두번째 공구로, 그리고 공구 T_1 '을 마지막 공구로

Table 2 Calculation Results for Total Machining Time

공구조합	#6	#5	#4	#3	#2	#1	Σ
654321	0.2819	0.6144	0.9279	1.5987	2.2186	3.8672	9.5087
65431	0.2819	0.6144	0.9279	1.5987	-	6.3519	9.7748
65421	0.2819	0.6144	0.9279	-	2.4494	3.8672	8.1408
65321	0.2819	0.6144	-	1.6458	2.2186	3.8672	8.8943
64321	0.2819	-	0.9279	1.5987	2.2186	3.8672	8.8943
54321	-	0.6144	0.9279	1.5987	2.2186	3.8672	9.2268
6641	0.2819	0.6144	0.9279	-	-	9.4247	11.2489
6631	0.2819	0.6144	-	1.6458	-	6.3519	8.8940
6621	0.2819	0.6144	-	-	2.4855	3.8672	7.2530
6431	0.2819	-	0.9279	1.5987	-	6.3519	9.1604
6421	0.2819	-	0.9279	-	2.4494	3.8672	7.5264
6321	0.2819	-	-	1.6458	2.2186	3.8672	8.0135
5431	-	0.6144	0.9279	1.5987	-	6.3519	9.4929
5421	-	0.6144	0.9279	-	2.4494	3.8672	7.8589
5321	-	0.6144	-	1.6458	2.2186	3.8672	8.3460
4321	-	-	1.2064	1.5987	2.2186	3.8672	8.8909
651	0.2819	0.6144	-	-	-	9.9679	10.8642
641	0.2819	-	0.9279	-	-	9.4247	10.6345
631	0.2819	-	-	1.6458	-	6.3519	8.2796
541	0.2819	-	-	-	2.4855	3.8672	8.8909
541	-	0.6144	0.9279	-	-	9.4247	10.9688
531	-	0.6144	-	1.6458	-	6.3519	8.6121
521	-	0.6144	-	-	2.4855	3.8672	6.9711
431	-	-	1.2064	1.5987	-	6.3519	9.1570
421	-	-	1.2064	-	2.4494	3.8672	7.5230
321	-	-	-	1.8348	2.2186	3.8672	7.9206
61	0.2819	-	-	-	-	9.9679	10.2498
51	-	0.6144	-	-	-	9.9679	10.5823
41	-	-	1.2064	-	-	9.4247	10.6311
31	-	-	-	1.8348	-	6.3519	8.1867
1	-	-	-	-	3.3159	3.8672	10.9671

사용하여 가공한다는 것을 의미하며, 본 예제의 경우 3개의 공구가 조합된 ' $T_6 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$ ' 에 의하는 경우에 "6.6386" (분)으로 최소값을 보이며, 이 공구조합을 '대안공구조합 1'이라고 한다. 3개의 공구로 구성된 나머지 경우는 모두 이 값을 초과하므로 최적해가 될 수 없으며, 이들을 제외한 나머지 경우 중에서 3개 이상의 공구조합 역시 모두 이보다 큰 값을 가지므로 고려대상에 제외되고, 2개 공구 및 1개 공구로 이루어진 조합에 대해 살펴보면 2개의 공구 ' $T_2 \rightarrow T_1$ ' 에 의하는 경우 "7.1831" (분)이 필요한 것으로 계산되었고, 이 공구조합을 '대안공구조합 2'로 한다.

1회 공구교환시간(tool exchange time)을 t_{TE} 라고 할 때, 대안공구조합 1은 $2t_{TE}$ (분)이 추가로 필요하고, 대안공구조합 2는 $1t_{TE}$ (분)이 추가로 필요하다. 따라서 공구교환시간이 일정하다고 하면, $t_{TE} > 0.5445$ (분), 즉, 1회 공구교환시간이 약 33 (초) 이상 소요되는 경우에는 ' $T_2 \rightarrow T_1$ '을, 그렇지 않으면 ' $T_6 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$ ' 을 최적의 공구조합으로 선정한다.

5. 결 론

기계가공부품에 일반적으로 존재하는 포켓형상(pocket feature)은 금형부품에 있어서도 빼놓을 수 없는 가공대상의 하나로, 제품마다 그 형상이 아주 다양한 형태를 취한다. 이러한 포켓형상의 가공과 관련하여 공구경로의 결정 또는 공구크기의 선정에 대해 몇 가지의 연구가 수행되어 왔다.

포켓가공은 공구의 크기, 공구경로의 결정, 절삭폭 및 절삭시간의 추정 등이 주된 관심사로서, 이 중에서 공구의 크기가 가장 기본이 되며 공구의 크기만 결정되면 나머지는 주어진 가공전략, 즉 지그재그 또는 컨투어링 방식에 따라 계산에 의해 결정할 수 있다. 본 연구에서는 총가공시간을 최소로 하는 최적의 공구크기 및 공구조합의 결정 방법과 선정된 공구의 크기로부터 공구경로의 계산과 절삭폭의 설정에 대해 기술하였다. 컨투어링 방식의 밀링가공에 있어 공구의 이동방향을 일정하게 유지하고, 현재의 공구에 의한 절삭으로 형성되는 가공부의 움푹 라인의 방향을 고려함으로써 포켓가공의 완료여부를 쉽게 확인할 수 있다. 따라서 포켓가공에 있어서의 공구의 크기와 종류, 공구경로 및 공구의 선회가공횟수 등을 간단하게 계산할 수 있으므로, 공정계획시스템에 효과적으로 사용할 수 있을 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

1. Yamazaki, K., Kawahara, Y., Jeng, J.C., and Aoyama, H., "Autonomous Process Planning with Real-Time Machining for Productive Sculptured Surface Manufacturing Based on Automatic Recognition of Geometric Features," Annals of the CIRP, Vol. 44/1, pp.439-444, 1995.
2. Lee, K., Kim, T.J., and Hong, S.E., "Generation of Toolpath with Selection of Proper Tools for Rough Cutting Process," Computer Aided Design, Vol. 26, No. 11, pp.822-831, 1994.
3. Held, M., "GeoPocket - A Sophisticated Computational Geometry Solution of Geometrical and Technological Problems arising from Pocket Machining," Computer Applications in Production and Engineering, pp.283-293, 1989.
4. Bala, M., and Chang, T.C., "Automatic Cutter Selection and Optimal Cutter Path Generation for Prismatic Parts," Int. J. Prod. Res., Vol.29, No.11, pp.2163-2176, 1991.
5. Lee, Y.S., Choi, B.K., and Chang, T.C., "Cut Distribution and Cutter Selection for Sculptured Surface Cavity Machining," Int. J. Prod. Res., Vol.30, No.6, pp.1447-1470, 1992.
6. Persson, H., "NC machining of arbitrarily shaped pockets," Computer Aided Design, Vol. 30, No. 3, pp.169-174, 1978.
7. Held, M., "A Geometry-based Investigation of the Tool Path Generation for Zigzag Pocket Machining," The Visual Computer, Vol. 7,

- pp.296-308, 1991.
8. Suh, Y.S., and Lee, K., "NC Milling Tool Path Generation for Arbitrary Pockets defined by Sculptured Surfaces." Computer Aided Design, Vol. 22, No. 5, pp.273-284, 1990.
 9. 신양수, 서석환, "신경회로망 방식에 의한 복잡한 포켓형상의 황삭경로 생성." 한국정밀공학회지, 제 12권, 제 7호, pp.32-45, 1995.