논 문 한국정밀공학회지 제15권 제9호 (1998년 9월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 15, No. 9, September 1998.

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단의 지원금에 의해 수행되었습니다.

3차원 포켓가공을 위한 절삭층 형성 및 공구선정

경 영 민*, 조 규 갑*

Generation of Cutting Layers and Tool Selection for 3D Pocket Machining

Young-Min Kyoung*, Kyu-Kab Cho*

ABSTRACT

In process planning for 3D pocket machining, the critical issues for the optimal process planning are the generation of cutting layers and the tool selection for each cutting layers as well as the other factors such as the determination of machining types, tool path, etc.. This paper describes the optimal tool selection on a single cutting layer for 2D pocket machining, the generation of cutting layers for 3D pocket machining, the determination of the thickness of each cutting layers, the determination of the tool combinations for each cutting layers and also the development of an algorithm for determining the machining sequence which reduces the number of tool exchanges, which are based on the backward approach. The branch and bound method is applied to select the optimal tools for each cutting layer, and an algorithmic procedure is developed to determine the machining sequence consisting of the pairs of the cutting layers and cutting tools to be used in the same operation.

Key Words : Tool Selection(공구선정), Pocket Machining(포켓가공), Cutting Layer(절삭층)

1. 서 론

포켓가공(pocket machining)은 기계부품의 가공에 있어서 흔히 볼 수 있는 가공형태로서, 일반적으로 플랫 엔드밀(flat endmill), 필렛 엔드밀(filleted endmill) 및 볼 엔드밀(ball endmill) 등의 공구를 사용하여 지그재그 밀링(zigzag milling) 또는 옵셋밀링(offsetted spiral-outward milling)의 방식으로 가공이 이루어진다. 포켓형상의 가공에 관련한 공정설계의 수행에 있어서 공구크기의 결정이 가장 중요한 의사결정사항이며, 이것을 기초로 하여 포켓의 형상윤곽을 고려한 각 공구경로간의 오버랩폭(overlap width)의 결정 및 공구경로의 형성 등이 이루어진다.

포켓형상의 가공에는 대개 크기가 다른 다수의 공구들이 사용되므로, 가용한 공구 중에서 최적의 공구조합을 선정하는 문제에서는 공구의 수가 증가함에 따라 그 경우

* 부산대학교 정밀정형 및 금형가공연구센터, 기계기술연구소, 산업공학과

의 수가 급격히 늘어나게 된다. 또한 일반적으로 포켓의 형상이 아주 다양하기 때문에 균일한 절삭깊이를 가지는 2차원 포켓가공에서조차도 적절한 공구를 결정하는 것이 쉽지가 않다[1]. 그리고 포켓가공의 경우, 황삭에서는 포켓의 깊이 방향으로 적정 두께만큼씩 절삭하는 2½차원 가공방식을 취하며, 중삭 및 정삭에 있어서는 황삭과정 중에 형성된 계단형태의 돌출부(shoulder)를 제거하는 방식으로 가공이 이루어진다. 기존의 연구에서는 2차원 평면 상에서의 공구경로의 생성[2], 2차원 평면 상에서의 공구 선정 및 공구경로의 생성[1,3,4], 곡면형상의 가공을 위한 공구경로의 생성[5-7] 및 3차원 포켓형상의 가공을 위한 공구 선정 및 공구경로의 생성[8,9] 등을 다루고 있다.

본 연구에서는 백워드 접근방법(backward approach)에 의해 일반적인 포켓형상의 가공에 있어서 황삭가공을 위한 절삭층의 형성과 그에 따른 최적공구의 선정을 다루었다. 또한 인접한 절삭층의 가공에 할당된 공구들을 연속적으로 사용할 수 있도록 함으로써 공구교환횟수를 감소시키기 위한 공구결합 알고리즘을 개발하였다.

2. 단일 절삭층에서의 포켓가공을 위한 최적공구의 선정

단일 절삭층에서의 포켓가공은 Fig. 1과 같이 지그재그 타입과 컨투어링 타입의 두 가지 방식으로 가공될 수 있으며, 컨투어링 타입에 의하는 것이 일반적이다. 엔드밀과 같은 절삭공구를 사용하여 포켓가공을 완성하기 위해서 공구는 항상 포켓형상의 윤곽선 내부에 완전히 포함되어야 한다. 그리고 가공의 효율을 높이기 위해서 가능한 직경이 큰 공구를 사용하며, 크기가 다른 여러 개의 공구가 사용될 때에는 직경이 큰 공구가 먼저 사용된다. 이상의 고찰과 공구의 가용성을 고려하여 주어진 포켓형상의 가공에 사용될 후보공구의 집합을 정할 수 있다.

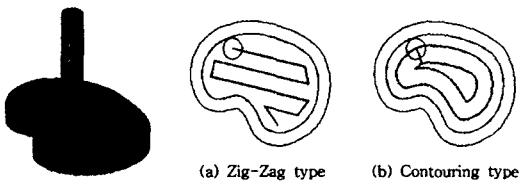

Fig. 1 Basic Machining Types for a Pocket

2.1 후보공구집합의 결정

포켓형상의 분석으로부터 얻어지는 이론적인 공구크기의 하한은 포켓형상의 윤곽선을 따라 이동하면서 윤곽선 내부의 모든 영역에 접근할 수 있는 최대 직경의 원에 의해 결정되며, 상한은 포켓형상의 윤곽선 내부에 완전히 포함되는 최대 직경의 원에 의해 결정된다. 즉, Fig. 2에 나타낸 것과 같은 포켓형상의 구성요소에 대해 r_i를 볼록정점 i 에서의 라운드반경, w_j를 오목정점 j 에서의 최소폭(strait width), d_{max}를 최대 오프셋거리, v_v와 v_c를 각각 볼록정점과 오목정점의 수라고 하면, 이론적인 공구크기의 하한 $\varphi(T^L)$과 상한 $\varphi(T^U)$는 다음과 같이 표현된다[10].

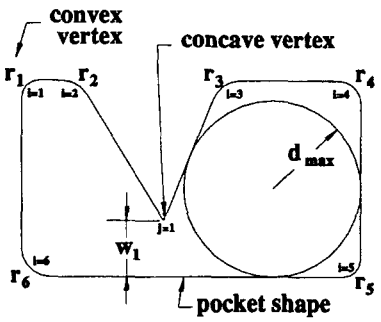

Fig. 2 Composition of Pocket

$$\varphi(T^L) = \min\{2r_i, w_j\},\ \text{where } i: 1,2,\cdots,v_v\ ; j: 1,2,\cdots,v_c \quad (1)$$

$$\varphi(T^U) = 2 \cdot d_{\max} \quad (2)$$

또한 이 범위는 작업장에 비치된 가용공구에 의해 제한된다. 즉, 포켓형상의 가공을 위한 후보공구는 식 (1)과 (2)를 만족하는 m 개의 공구들로 구성되며, 후보공구집합 S(T)는 다음과 같이 표현된다.

$$S(T) = \{T_1, T_2, T_3, \cdots, T_m\},\ \text{where } \varphi(T_{i-1}) \le \varphi(T_i) \text{ for } i = 2,3,\cdots,m \quad (3)$$

단, 식 (3)에서 T_1은 공구 데이터베이스에 속하는 가용공구 중에서 $\varphi(T_1) \le \varphi(T^L)$을 만족하는 최대직경의 공구이다.

2.2 최적공구조합의 결정

포켓가공에 있어서 크기가 다른 다수의 밀링공구가 필요할 때 소재의 제거효율을 높이기 위해 직경이 큰 공구

순으로 사용하는 것이 일반적이다. 따라서 식 (3)에 주어진 것과 같이 후보공구집합 $S(T)$는 공구의 직경 순으로 나열되며, 이 중에서 최소공구인 T_1은 주어진 포켓형상의 가공을 완성하기 위해 반드시 필요하므로 항상 최적공구조합에 포함된다.

후보공구집합을 구성하는 공구들을 대상으로 최소의 가공시간을 주는 최적공구조합은 Fig. 3에 주어진 공구조합트리에 대해 분기한계법을 적용하여 구할 수 있다. Fig. 3의 공구조합트리에서 레벨 i는 i 번째 공구로 어느 공구를 사용할 것인가를 결정한다. 레벨 1의 T_1 노드는 공구 T_1만을 단독으로 사용하여 포켓가공을 완성하게 됨을 의미하며, T_2노드는 공구 T_2를 첫 번째 공구로 사용하여 가공한 다음, 공구 T_1을 그 다음 공구로 사용하여 포켓가공을 완료하고 가공작업을 끝낸다는 것을 뜻한다. 즉, 레벨 1에 있는 임의의 공구를 첫 번째 공구로 사용하고, 하위레벨에 있는 직경이 작은 공구를 포함하여 최소공구 T_1을 마지막 공구로 하는 공구조합을 얻을 수 있으며, 이것이 하나의 대안공구조합을 형성하게 된다.

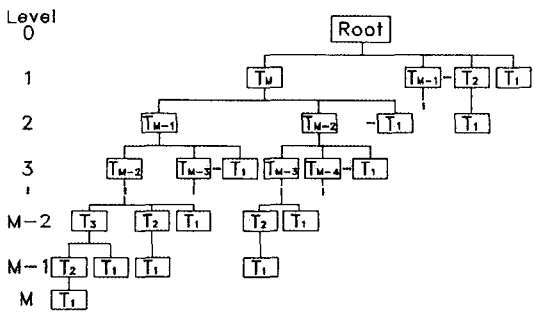

Fig. 3 Tool Combination Tree

공구조합트리로부터 얻을 수 있는 대안공구조합의 경우의 수는 후보공구들의 수를 m이라고 할 때 2^{m-1} 이다. 본 연구에서는 Fig. 3의 루트노드로부터 m 개의 후보공구들을 하위노드로 생성한 후 각 노드에서 분기과정을 수행한다. 이 때, 각 노드에서의 현가공시간을 하계로 설정하여 분기한계법을 적용함으로써 최소의 가공시간을 가지는 최적공구조합을 구할 수 있으며, 또한 2^{m-1} 의 대안공구조합을 모두 고려하지 않고 보다 적은 계산과정으로 최적의 해를 얻을 수 있다.

2.3 공구경로의 계산

대안공구조합에 의한 가공시간을 산정하기 위해서는 이 공구들의 이동거리를 필요로 한다. 본 연구에서는 오프셋 밀링가공 방식으로 포켓을 가공하는 경우를 가정하여 공구경로를 형성한 후, 총가공시간을 계산한다.

공구경로를 형성하기 위해 먼저 고려하고자 하는 공구를 기준으로 포켓형상의 윤곽선으로부터 포켓의 내부로 오프셋 라인을 생성하고 이들을 연결한 가상의 공구경로를 구한 다음, 이 경로의 방향을 역으로 취한 것을 공구의 가공경로로 설정한다.

해당 공구가 접근할 수 있는 임의의 정점에서부터 가공이 시작되는 것으로 하여 포켓의 윤곽선을 따라 시계방향으로 이동하면서 오프셋 라인을 반복하여 형성하고 이들을 연결한 것을 가상의 공구경로로 설정한다. Fig. 4에 나타낸 바와 같이 포켓 윤곽선 내부에서 가장 바깥쪽의 오프셋 라인은 포켓형상의 윤곽선으로부터 공구의 반경만큼 오프셋되어 형성되며, 나머지의 오프셋 라인은 미가공부의 발생을 방지하기 위해 자신과 인접해 있는 바깥쪽 오프셋 라인에 의한 가공부와 현재의 오프셋 라인에 의한 가공부가 어느 정도 중첩되도록 형성된다. 이 중첩의 정도를 오버랩폭(overlap width; d_{ov})이라고 하며, 그 값은 정점을 이루는 선의 형태 및 사이각(β), 정점에서의 라운드 반경(r_0) 및 공구의 직경(φ_T)에 의해 정해진다[10].

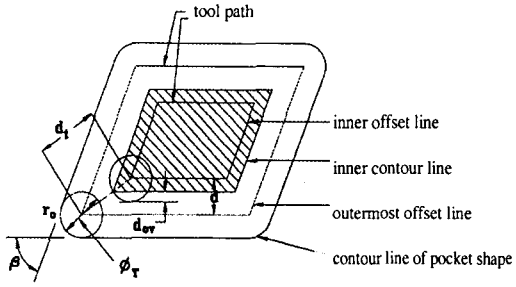

Fig. 4 Generation of Tool Path

2.4 미가공부에서의 후속공구의 이동횟수

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 이러한 상황이 발생하는 경우에는 이 부분을 가공하기 위한 후속공구의 이동횟수(number of passes)를 알아야 한다. 일반

적으로, 정점을 이루는 두 직선의 사이각의 2등분 방향으로 미가공부의 두께가 최대이고, 이곳을 벗어날수록 그 폭이 감소하므로 후속공구의 이동횟수는 Fig. 5와 같이 점 d에서 대응하는 변에 내린 수선의 길이(l)로부터 결정된다. 즉, Fig. 5(a)에서 공구 T를 사용하여 가공이 끝났을 때 미가공부의 영역은 빗금친 부분으로 나타나 있다. 점 d에서 대응하는 변에 수선을 내렸을 때 그 수선의 길이는 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 비로서 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\#\ of\ \ pass = \begin{cases} n\ , & if\ \ n : integer \\ \lfloor n+1 \rfloor, & if\ \ n : real \end{cases} \qquad (4)$$
$$where,\ n = l/\phi_{T'}$$

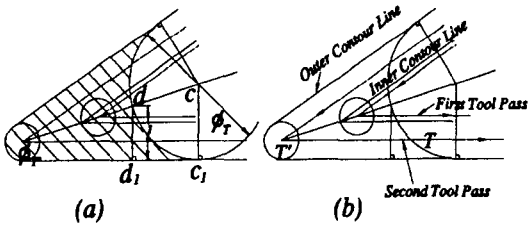

Fig. 5 Number of Tool Passes

또한, Fig. 5(b)에 주어진 미가공부의 가공을 위한 공구경로를 나타내었다.

2.5 공구의 가공경로 및 총가공시간

실제의 가공에 사용할 공구경로는 가상의 공구경로를 역방향으로 하여 형성되며, 이 경로의 길이를 합산하여 각 공구 또는 공구조합의 이동거리를 구한 후, 각 공구에 대한 적정 이송속도를 사용하여 총가공시간을 계산한다. 최적의 공구조합은 총가공시간을 최소로 하는 것이며, 최소 공구만에 의한 단독 가공시의 총가공시간을 기준으로 하여 분기한계법을 적용하며, 더 이상 개선된 결과를 보일 수 없는 조합을 사전에 고려에서 제외할 수 있으므로 보다 적은 계산 노력으로 최적의 해에 도달할 수 있다.

3. 3D 포켓가공을 위한 절삭층 형성 및 공구 선정

3차원 포켓형상의 가공은 일반적으로 Fig. 6에 보인 바와 같이 다수의 겹쳐져 있는 절삭층에 대한 황삭가공과 잔여 돌출부의 제거가공으로 이루어지며, 마지막으로 연마공정에 의해 마무리된다. 특히 황삭가공은 Fig. 6(a)와 같이 여러 층의 절삭평면에 대한 2½차원 밀링가공의 연속적인 공정으로 구성된다. 따라서 3차원 포켓형상을 가공하기 위해서는 선정된 한 공구에 적합한 절삭깊이만큼의 두께를 가지는 여러 개의 절삭층으로 포켓을 분할한 후, 외부에 노출되어 있는 가장 외측면으로부터 한 층씩 단계적으로 절삭가공을 수행해야 한다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 포켓의 최저점에서 시작하여 포켓의 전체 깊이에 따라 절삭층과 각 절삭층에서의 최적 공구 및 절삭층의 두께를 결정하여 모든 절삭층을 형성한 다음, 절삭층의 순서를 반대로 하여 가공순서를 결정한다.

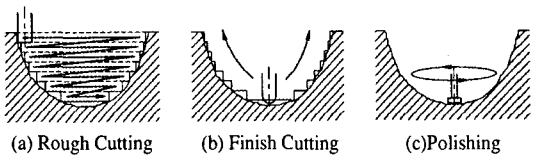

Fig. 6 Processes of Pocket Machining

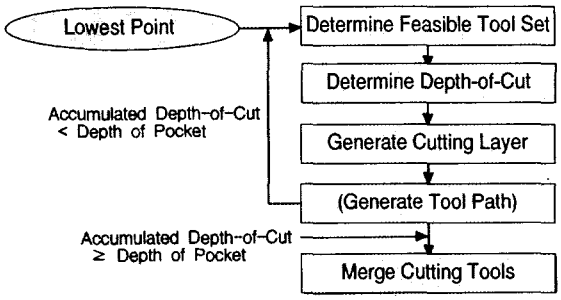

Fig. 7 Generation of Cutting Layers and Tools

3.1 초기 절삭층 형성

초기 절삭층이란 포켓의 가장 아래 부분에 놓이게 될 절삭층을 말하며, 이것은 Fig. 8에 주어진 바와 같이 포켓의 최저점에서의 가상 수평면과 포켓과의 접촉 형태로부터 결정된다.

가상의 수평면과 포켓의 최저점에서의 접촉형태는 점접촉(point contact), 선접촉(line contact) 및 면접촉(face contact)으로 구분되며, 이것은 초기절삭층의 가공에 사용될 공구선정에 직접적으로 사용된다.

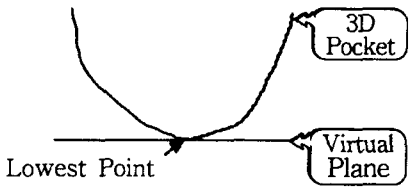

Fig. 8 Generation of Initial Cutting Layer

점접촉은 Fig. 9 (1-a)와 같은 라운드타입(round type)과 Fig. 9 (1-b)와 같은 핀타입(pin type)으로 세분된다. 라운드타입은 포켓의 최저점이 가상수평면과 접촉하는 부분이 구의 형상을 취하는 경우로서 절삭공구로 가공이 가능한 형태이며, 그 직경을 d, 공구의 직경을 φ_T 라고 할 때 $0<\varphi_T\leq d$를 만족하는 최대크기의 엔드밀 공구를 사용한다. 핀타입은 포켓의 최저점이 뾰족한 형상을 취하고 있어 가상수평면과의 접촉형태가 날카로운 점으로 만나는 경우이며, 절삭공구로는 가공이 불가능하므로 고려대상에서 제외된다.

선접촉은 Fig. 9 (2-a)와 같은 라운드타입(round type)과 Fig. 9 (2-b)와 같은 에지타입(edge type)으로 세분된다. 라운드타입은 포켓의 최저점이 가상수평면과 접촉하는 부분이 실린더 또는 도넛과 같은 형상으로 존재하며, 그 반경을 r 이라고 할 때 $0<\varphi_T\leq 2r$을 만족하는 최대크기의 엔드밀 공구를 사용한다. 에지타입은 포켓의 바닥면이 180°이하의 각도로 만나는 두 개의 평면과 같은 형상을 취하고 있어 절삭공구로 가공이 불가능하고 고려대상에서 제외된다.

면접촉은 Fig. 9(3)과 같이 포켓의 바닥면이 평면으로 이루어진 경우이며, 이 평면에 포함되는 최대크기의 엔드밀 공구를 사용한다.

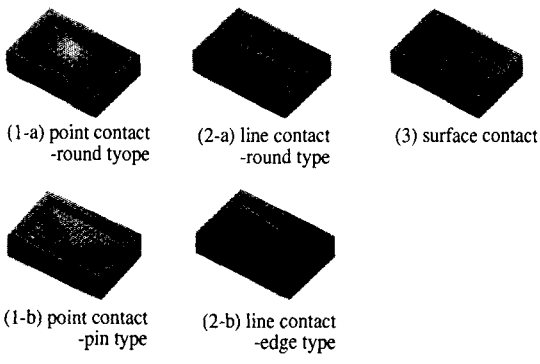

Fig. 9 Contact Types of Pocket and Virtual Plane

3.2 절삭층의 두께 및 인접 절삭층의 형성

가상 수평면과 포켓 최저점과의 접촉형태로부터 얻어진 공구에 대해서 피삭재 및 공구의 재질, 가공 방식에 따라 회전수, 이송속도 및 절삭깊이 등의 절삭조건에 대한 데이터를 얻을 수가 있으며[11], 이 절삭깊이는 선정된 공구로 가공할 수 있는 피삭재의 절삭깊이를 나타내므로 초기 절삭층의 두께로 설정할 수 있다.

다음으로, 초기 절삭층의 윗면은 인접한 상위 절삭층의 아랫면을 구성하므로, 이 면을 포함하는 가상 수평면과 교차하는 포켓의 윤곽선을 기준으로 단일 절삭층에서의 포켓가공을 위한 최적공구의 선정방법을 적용함으로써 새로운 절삭층의 가공에 적합한 최적공구의 집합을 구할 수 있으며, 선정된 공구로부터 이 절삭층의 두께가 얻어진다. 따라서 이 과정을 포켓의 전체 깊이에 대해 반복함으로써 포켓형상의 깊이에 따른 절삭층의 형성과 각 절삭층의 가공공구 및 절삭층의 두께를 결정할 수 있다.

3.3 절삭층간의 공구의 결합 및 가공순서의 결정

포켓형상의 깊이 방향으로 적정의 두께를 가지는 모든 절삭층에 대해서 각 층별로 최적의 공구들이 선정되는 반면, 인접해 있는 절삭층들에 동일한 공구들이 사용될 수 있다. 이 경우에 각 절삭층마다 순차적으로 가공을 완성해 나간다면 절삭층이 달라질 때마다 동일한 공구가 반복적으로 사용되어 공구교환이 이루어져야 한다. 따라서 인접한 절삭층에 대해 동일한 공구가 선정되어 있을 때에는 공구교환횟수를 최소화하기 위해 공구의 사용순서를 조정하여 줌으로써 공구교환횟수를 최소화할 수 있다.

Table 1의 절삭층-공구행렬에서 공구번호는 포켓의 가공에 사용될 모든 공구를 나타내며, 번호가 작은 것일수록 공구의 직경이 크다. 절삭층의 번호 1은 가장 아래에 위치한 절삭층(초기 절삭층)을 나타내며, 번호가 가장 큰 것은 최상부에 위치한 절삭층을 나타낸다. 절삭층 1과 공구 3이 만나는 란에 있는 숫자 1은 절삭층 1의 가공에는 공구 3이 사용된다는 것을 의미하며, 빈란은 그 절삭층의 가공에 해당 공구가 사용되지 않는다는 것을 의미한다.

Table 1 A Cutting Layer - Tool Matrix

Cutting Layers \ Tools	1	2	3	4	5	6	7	8	9
6			1						1
5		1				1			1
4				1					1
3		1	1				1		1
2			1					1	
1			1	1				1	

즉, 인접한 절삭층 1과 2의 가공에 할당된 첫 번째 공구는 두 경우 모두 공구 3으로 동일하다. 이 경우에, 절삭층 1을 공구 3, 4 및 8로 가공한 후에 절삭층 2를 공구 3과 공구 8로 가공한다면 모두 4회의 공구교환이 필요하다. 반면에, 두 절삭층에 대해 절삭층 1을 공구 3으로 가공한 후에, 동일 공구로 절삭층 2를 가공하고, 다시 절삭층 1에 대해서는 공구 4와 8을 사용하여 가공을 완료한 이후에 절삭층 2에 대해 공구 8을 사용하여 가공을 완료하는 경우에는 공구교환횟수가 2회로서, 개개의 절삭층을 가공완료한 다음에 그 다음 절삭층을 가공하는 경우에 비해 공구교환횟수가 2회 줄어듬을 볼 수 있다. 즉, 인접한 절삭층에 대해 선정된 공구를 비교하여 적절히 결합함으로써 공구교환횟수를 줄일 수 있다.

Table 1의 절삭층-공구 행렬을 M[i,j] (i=I,I-1,…,2,1; j=1,2,…,J) 로 표시한다. M 행렬에서 동일 공구들의 결합에는 다음의 규칙이 적용된다.

(규칙 1) 동일한 절삭층에서의 공구의 순서는 왼쪽에서 오른쪽으로 할당된다. 즉, 직경이 큰 공구를 먼저 사용한다.

(규칙 2) 인접한 절삭층 간의 동일 공구들은 묶어서 하나의 그룹으로 할당한다. 즉, 인접한 절삭층에 동일한 공구들이 할당되어 있을 때에는 이 공구들을 사용하여 인접한 절삭층을 연속 가공함으로써 공구교환횟수를 줄인다.

(규칙 3) 인접한 절삭층 간의 공구의 순서는 상부 절삭층을 우선으로 하여 오른쪽에서 왼쪽 또는 위에서 아래로 할당된다. 즉, 인접한 절삭층에 동일한 공구들이 할당되어 있다고 하더라도, 이들 공구를 결합함으로써 바로 위의 인접 절삭층에서 사용된 이전 공구의 직경이 현재 절삭층에서 사용된 이전 공구의 직경보다 크게 되는 경우에는 고오징(gorging)이 발생함으로 서로 다른 그룹으로 분리해야 한다.

이상과 같은 규칙으로부터 인접한 절삭층 간의 공구 결합 및 공구 순서의 조정알고리즘을 얻을 수 있으며, 이것의 pseudo-code를 부록에 수록하였다.

4. 적용사례

본 연구에서 제안한 3차원 포켓가공을 위한 절삭층의 형성과 공구의 순서결정을 위한 알고리즘에 대해 Fig.10 (a)에 주어진 포켓형상을 대상으로 하여 적용과정을 예를 들기로 한다. 그림에서 공작물의 전체 치수는 400×300×150 [mm]이며, 윗면에 마름모꼴의 포켓형상이 정의되어 있다. 포켓의 치수는 300×200 [mm]의 크기로 시작하여 아래로 갈수록 작아져 바닥면은 130×30 [mm]의 크기를 가지며, 깊이는 85 [mm]이다. 그리고 측면끼리 교차하는 모서리에는 R15 및 R10의 라운드가 지정되어 있다. 이 공작물의 3차원 형상을 Fig. 10 (b)에 나타내었다.

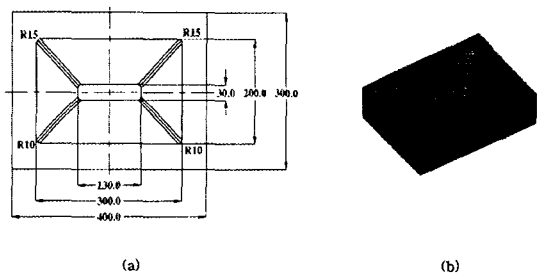

Fig. 10 An Example of 3D Pocket (depth=85)

공작물의 재질은 인장강도 50~75 kgf/㎟의 탄소강이며, 사용되는 공구는 날의 수가 2개인 플랫 엔드밀(flat endmill)이다. 슬롯 형태의 가공을 기준으로 할 때, 공작물과 공구의 재질에 따른 회전수와 이송속도는 Table 2와 같이 주어진다[11].

현재 작업장에 비치되어 있는 가용공구를 조사한 결과가 Table 3으로 정리되었다.

(1) 초기 절삭층의 형성

포켓의 바닥면을 대상으로 초기 절삭층을 형성한다. 이 면의 형상은 Fig. 11과 같다.

초기 절삭층의 가공을 위한 공구의 범위는 ϕ20~ϕ30으로, 가용공구를 고려하면 후보공구집합 S(T)는 다음과 같다.

Table 2 Recommended Milling Condition

Cutting Condition / Tool Dia.[mm]	Medium Carbon Steel (Tensile Strength 50~75 kgf/㎟) Rev.(rpm)	Feed Rate (㎜/min)	Depth-of-Cut(㎜)
0.6	12,500	48	0.3
0.8	9,500	53	0.4
1	7,500	53	0.5
2	4,500	65	1.0
3	3,360	75	1.5
4	2,360	85	2.0
5	1,900	95	2.5
6	1,700	100	3.0
8	1,180	118	4.0
10	950	132	5.0
12	750	118	6.0
14	670	118	7.0
16	600	112	8.0
18	530	106	9.0
20	475	95	10.0
22	425	85	11.0
24	375	75	12.0
25	375	75	12.5
26	375	75	13.0
28	335	65	14.0
30	335	65	15.0
32	300	60	16.0
35	265	53	17.5
36	265	53	18.0
40	236	48	20.0
45	212	42	22.5
50	190	38	25.0

Table 3 List of Available Cutting Tools on the Workplace

Kind of Tools	Flat Endmill
Dia.(mm)	1 2 4 6 8 10 14 16 20 24 30 40 50 (total: 13)

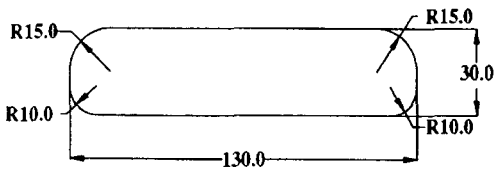

Fig. 11 Pocket Shape of the Initial Cutting Layer

Table 4 Tool Travel Distances and Machining Times for Initial Cutting Layer

		T_3	T_2	T_1	Machining Time(min)
Tool Combination	$T_3 \rightarrow T_2 \rightarrow T_1$	100	224	234	$4.232+2T_{tc}$
	$T_3 \rightarrow T_1$	100	-	240	$2.802+T_{tc}$
	$T_2 \rightarrow T_1$	-	224	234	$4.152+T_{tc}$
	T_1	-	-	240	2.481
Feed Rate(㎜/min)		65	75	95	

* Remark: T_{tc} means Tool Change Time

$$S(T) = \{\varphi 20,\ \varphi 24,\ \varphi 30\}$$

이 후보공구집합을 가지고 공구조합트리를 형성하고, 각 공구조합에 대한 이동거리와 가공시간을 계산한 결과를 보이면 Table 4와 같다.

그러므로 초기 절삭층의 가공을 위한 최적의 공구는 T_1, 즉 $\varphi 20$인 플랫 엔드밀을 선정할 수 있으며, 이 때의 절삭깊이는 10[㎜]이다. 따라서 초기 절삭층은 포켓의 바닥면으로부터 두께 10 [㎜]인 층이며, 사용공구는 $\varphi 20$ 플랫 엔드밀이다.

(2) 인접 절삭층의 형성

초기 절삭층의 윗면을 포함하는 가상 수평면과 포켓의 교차평면을 구하면 Fig. 12와 같다.

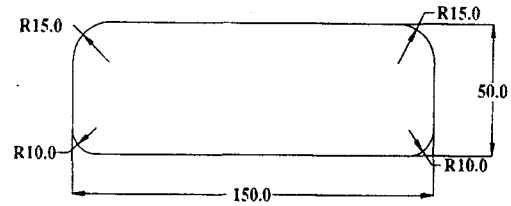

Fig. 12 Pocket Shape of the Second Cutting Layer

이 평면의 윤곽선은 초기 절삭층의 윗면과 같은 평면상에 존재함과 동시에 인접 절삭층의 아랫면을 형성한다. 따라서 Fig. 12에 주어진 윤곽선을 초기 절삭층과 인접한 절삭층인 두 번째 절삭층의 형성을 위한 기준면으로 사용하며, 이로부터 최적공구의 조합과 절삭층의 두께를 구한다.

두 번째 절삭층의 가공에 사용될 수 있는 공구의 범위는 $\varphi 20 \sim \varphi 50$이며, 작업장의 가용공구를 고려하여 후보공구집합 $S(T)$를 구하면 다음과 같다.

$$S(T) = \{\varphi 20,\ \varphi 24,\ \varphi 30,\ \varphi 40,\ \varphi 50\}$$

이 후보공구집합을 가지고 공구조합트리를 형성하면 총 16 개의 대안공구조합을 얻게 되며, 각 대안에 대해 가공시간을 계산하면 공구 T_1을 사용하는 경우에 4.565 [min]으로 최소가 됨을 볼 수 있다. 그러므로 두번째 절삭층의 가공을 위한 최적의 공구 역시 T_1, 즉 $\varphi 20$인 플랫 엔드밀을 사용하는 경우이며, 이 때의 절삭깊이 또한

Table 5 Summary for Cutting Layers and Their Corresponding Tools

# of Cutting Layers	Optimal Tool Combination	Thickness of Cutting Layer(mm)	Machining Time(min)
1	T_1	10	2.481
2	T_1	10	4.565
3	T_1	10	7.176
4	T_1	10	11.302
5	T_1 or $T_2 \rightarrow T_1$	12	$12.915+T_{tc}$
6	T_1	10	19.724
7	T_1	10	24.377
8	T_1 or $T_4 \rightarrow T_1$	20	$25.460+T_{tc}$

10[㎜]가 된다. 따라서 두번째 절삭층은 초기 절삭층의 윗면으로부터 두께 10 [㎜]인 층이며, 사용공구는 φ20 플랫 엔드밀이다.

나머지에 대해 위의 과정을 적용함으로써 포켓의 전체 깊이에 대한 절삭층의 형성과 사용공구의 선정을 수행하며, 그 결과를 요약하면 Table 5와 같다.

Table 5에서 절삭층 5와 8의 경우에는 공구교환시간에 따라 최적공구조합이 최종 확정된다. 즉, 절삭층 5의 경우에는 공구교환시간이 약 126(초) 미만이면 '$T_2 \rightarrow T_1$'을, 그렇지 않으면 'T_1'을 최적공구조합으로 결정하며, 절삭층 8의 경우에는 공구교환시간이 약 247(초) 미만이면 '$T_4 \rightarrow T_1$'을, 그렇지 않으면 'T_1'을 최적공구조합으로 결정한다. 본 사례에서는 공구교환시간이 60(초)이며 일정하다고 가정한다. 따라서 절삭층 5의 경우에는 '$T_2 \rightarrow T_1$'을, 절삭층 8의 경우에는 '$T_4 \rightarrow T_1$'을 최적공구조합으로 결정한다.

(3) 공구의 결합

인접한 절삭층 간에 할당된 공구들을 결합하여 공구교환횟수를 줄이기 위해 직경이 최대인 공구부터 직경이 감소하는 순으로 절삭층-공구 행렬을 작성하면 Table 6과 같이 된다. Table 6에 대해 본 연구의 알고리즘을 적용한 결과를 요약하여 나타내면 Fig. 13과 같다. 즉, 공구 T_4를 사용하여 절삭층 8을 가공한 후, 공구 T_1을 사용하여 절삭층 8의 나머지 부분과 절삭층 7 및 6을 가공한 다음에, 공구 T_2로 절삭층 5를 가공하고 이어서 공구 T_1으로 절삭층 5의 나머지 부분과 절삭층 4, 3, 2 및 1을 가공하는 일련의 가공순서를 얻을 수 있다. 그리고 결정된 가공순서에 따라 주어진 포켓을 황삭가공함으로써 Fig. 14와 같은 형상을 얻을 수 있다.

Table 6 Cutting Layer - Tool Matrix

Cutting Layer \ Tools	1 (T_5)	2 (T_4)	3 (T_3)	4 (T_2)	5 (T_1)
8		1			1
7					1
6					1
5				1	1
4					1
3					1
2					1
1					1

```
STAGE 1:
when j=2: g=1, layer[g]=8, tool[g]=2, G[g]={8}, E[g]=1
when j=4: g=2, layer[g]=5, tool[g]=4, G[g]={5}, E[g]=1
when j=5: g=3, layer[g]=8, tool[g]=5, G[g]={8,7,6,5,4,3,2,1}, E[g]=8
STAGE 2:
when g=1: no_grp=1, final_G[no_grp]=G[g]={8}, final_tool[g]=2
when g=2: no_grp=2, final_G[no_grp]=G[g]={5}, final_tool[g]=4
when g=3: no_grp=3, final_G[no_grp]=G[g]={8,7,6}, final_tool[g]=5
          no_grp=4, final_G[no_grp]=G[g]={5,4,3,2,1}, final_tool[g]=5
STAGE 3:
when i=1: final_G[i]={8}, TEMP[8,final_tool[i]]=TEMP[8,2]=i
when i=2: final_G[i]={5}, TEMP[5,final_tool[i]]=TEMP[5,4]=i
when i=3: final_G[i]={8,7,6}, TEMP[6,final_tool[i]]=TEMP[6,5]=i
when i=4: final_G[i]={5,4,3,2,1}, TEMP[1,final_tool[i]]=TEMP[1,5]=i

when order=1: SEQ[order]=TEMP[8,2]=1
when order=1: SEQ[order]=TEMP[6,5]=3
when order=1: SEQ[order]=TEMP[5,4]=2
when order=1: SEQ[order]=TEMP[1,5]=4

machining sequences are as follows:
when i=1: layer_list[i]=final_G[SEQ[i]]=final_G[1]={8},
          tool_number[i]=final_tool[SEQ[i]]=final_tool[1]=2
when i=2: layer_list[i]=final_G[SEQ[i]]=final_G[3]={8,7,6},
          tool_number[i]=final_tool[SEQ[i]]=final_tool[3]=5
when i=3: layer_list[i]=final_G[SEQ[i]]=final_G[2]={5},
          tool_number[i]=final_tool[SEQ[i]]=final_tool[2]=4
when i=4: layer_list[i]=final_G[SEQ[i]]=final_G[4]={5,4,3,2,1},
          tool_number[i]=final_tool[SEQ[i]]=final_tool[4]=5
```

Fig. 13 Abstracted Results of Computing Procedures of the Given Algorithm

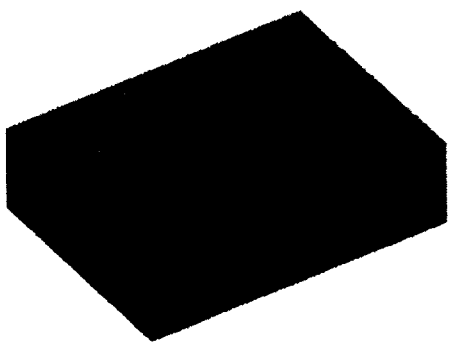

Fig. 14 The Shape from Rough Cutting for the Pocket

5. 결 론

포켓가공을 위한 공정계획의 수립에 있어서는 어떤 크기의 공구를 사용하여 어느 깊이만큼 가공할 것인가를 결정하는 것이 중요한 문제가 된다. 3차원 포켓형상은 일반적으로 세로방향을 따라 다수개로 분할된 절삭층을 황삭가공한 후 숄더부를 제거함으로써 가공이 이루어지므로, 바꾸어 생각하면 여러 개의 고유한 두께를 가지는 포켓형상이 겹쳐져서 3차원 포켓형상을 구성한다고 볼 수 있다.

본 연구에서는 포켓의 바닥면을 기준으로 하여 가상 수평면과의 접촉형태로부터 절삭공구의 크기를 결정하고, 그에 따른 절삭깊이로부터 절삭층의 두께를 설정하고, 이것을 포켓의 전체 깊이에 대해 고려함으로써 절삭층의 형성과 공구의 선정을 순차적으로 수행하였다. 또한 인접한 절삭층 간에 할당된 공구들을 비교하여 공구의 교환횟수를 줄일 수 있도록 절삭층 간의 가공순서를 조정하는 알고리즘을 개발하였다.

참 고 문 헌

1. Held, M., "GeoPocket - A Sophisticated Computational Geometry Solution of Geometrical and Technological Problems arising from Pocket Machining," Computer Applications in Production and Engineering, Proc. CAPE '89, North Holland, Amsterdam Tokyo, pp. 283-293, 1989.
2. 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.
3. Held, M., "A Geometry-based Investigation of the Tool Path Generation for Zigzag Pocket Machining," The Visual Computer, Vol. 7, pp. 296-308, 1991.
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. Rao, N., Ismail, F., and Bedi, S., "Tool Path Planning for Five-axis Machining using the Principal Axis Method," Int. J. Mach. Tools Manufact., Vol. 37, No. 7, pp. 1025-1040, 1997.
6. Persson, H., "NC machining of arbitrarily shaped pockets," Computer Aided Design, Vol. 30, No. 3, pp. 169-174, 1998.
7. 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.
8. 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.
9. 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.
10. 경영민, 조규갑, 전차수, "포켓형상가공을 위한 최적 공구 선정방법," 한국정밀공학회, 제14권, 제7호, pp. 49-58, 1997.
11. (株)OSG, OSG 綜合カタログ - エンドミル 切削條件基準表, Vol. 54, p. 167.

부 록

[Pseudo-Codes for Reducing Number of Tool Exchange and Re-Ordering Tool Sequence]

let, G : 생성된 예비그룹의 수 (g=1,2,…,G)
G[g] : 예비그룹 g에 속하는 layer들의 집합
E[g] : 예비그룹 g에 속하는 layer들의 수
layer[g] : 예비그룹 g의 첫 번째 layer
tool[g] : 예비그룹 g의 가공을 위한 공구번호
no_grp : 생성된 최종그룹의 수 (g′=1,2,…,G′)
final_G[g′] : 최종그룹 g′에 속하는 layer들의 집합
final_E[g′] : 최종그룹 g′에 속하는 layer들의 수
final_tool[g′] : 최종그룹 g′의 가공을 위한 공구번호

/* STAGE 1 : 예비그룹 형성단계 (Pre-Grouping

```
Stage) */
g=0, E[g]=0;
for all j {
  for i=I to 1 {
    if ( M[i,j] = 1 ) {
      g = g + 1;
      layer[g] = i;
      tool[g] = j;
      DO { Append i to G[g];
        E[g] = E[g] + 1;
        i = i - 1; } while ( M[i,j] = 1 ); } } }
G = g;

/* STAGE 2 : 예비그룹 분할단계 (Group-Splitting
Stage) */
Execute the following procedures for all groups
G[g] such that E[g]=1
no_grp=0;
for g=1 to G {
  if ( E[g] = 1 ) {
    no_grp = no_grp + 1;
    copy G[g] into final_G[no_grp];
    final_tool[no_grp] = tool[g]; } }
Execute the following procedures for all groups
G[g] such that E[g]>1
no_grp = no_grp + 1;
add layer[g] into final_G[no_grp];
for l = layer[g] - 1 to layer[g] - E[g] +1 {
  mcount = 0;
  scount = 0;
  for  m = tool[g] - 1 to 1 {
    if ( M[l,m] = 0 ) {
      mcount = mcount + 1;
      if ( mcount = tool[g]-1 ) {
        add layer l into final_G[no_grp];
        final_tool[no_grp] = tool[g]; } }
    else {
      for s = tool[g]-1 to 1 {
        if ( M[l+1, s] = 0 ) {
          scount = scount + 1;
     if ( scount = tool[g]-1 ) {
       stop merging;
       if ( l ≠ layer[g]-E[g]+1 ) {
         no_grp = no_grp + 1;
         add layer l into final_G[no_grp];
         final_tool[no_grp] = tool[g]; }
       m=1; } }
   else {
    EXIT = 0;
    t = tool[g] - 1;
    DO {
      if ((M[l+1,t]=1 && M[l,t]=1)OR(M
      [l+1,t]=1 && M[l,t]=0)){
        add layer l into final_G[no_grp];
        final_tool[no_grp] = tool[g];
        EXIT=1; }
      else if ( M[l+1,t]=0 && M[l,t]=0 ) {
        t = t - 1; }
      else if ( M[l+1,t]=0 && M[l,t]=1 ) {
        stop merging;
        if ( l ≠ layer[g]-E[g]+1 ) {
          no_grp = no_grp + 1;
          add layer l into final_G[no_grp]; }
        EXIT = 1; }
      else {
        print("error");
        EXIT=1; }
    } while ( EXIT = 0 );
   s=1, m=1; } } } } }

/* STAGE 3 : 가공순서 결정 (Sequencing Stage) */
for i=1 to no_grp {
  count the number of elements in final_G[i]
  assign the value to final_E[i];
  retrieve the lowest-layer number in final_G[i];
  assign the number to the temporary variable, LN;
  TEMP[LN, final_tool[i]] = i; }
order=0;
for i=I to J {
  for j=1 to J {
    if ( TEMP[i,j] ≠ NULL ) {
      order = order + 1;
      SEQ[order] = TEMP[i,j]; } } }
The machining sequence, layer_list[i] and
tool_number[i], has been found:
for i=1 to no_grp {
   layer_list[i] = final_G[SEQ[i]];
   tool_number[i] = final_tool[SEQ[i]]; }
```