

低軸 CNC 환경에서의 황삭가공

강지훈*, 서석환**, 이정재***

Rough Cut Tool Path Planning in Fewer-axis CNC Machining

Ji-Hoon Kang*, Suk-Hwan Suh** and Jung-Jae Lee***

ABSTRACT

This paper presents rough cut tool path planning for the fewer-axis machine consisting of a three-axis CNC machine and a rotary indexing table. In the problem dealt with in this paper, the tool orientation is "intermediately" changed, distinguished from the conventional problem where the tool orientation is assumed to be fixed. The developed rough cut path planning algorithm tries to minimize the number of tool orientation (setup) changes together with tool changes and the machining time for the rough cut by the four procedures: a) decomposition of the machining area based on the possibility of tool interference (via convex hull operation), b) determination of the optimal tool size and orientation (via network graph theory and branch-and bound algorithm), c) generation of tool path for the tool and orientation (based on zig-zag pattern), and d) feedrate adjustment to maintain the cutting force at an operation level (based on average cutting force). The developed algorithms are validated via computer simulations, and can be also used in pure five-axis machining environment without modification.

Key words: Rough cut path planning, Fewer-axis CNC machining, Setup change, Tool change, Five-axis machining

1. 개 요

황삭가공은 불필요한 영역을 제거하는 과정으로서, 가공시간의 대부분을 차지하며, 가공정확도를 고려하지 않아도 되는 특징을 갖고 있다. 따라서 황삭가공의 효율성은 가공정밀도가 아닌 가공시간에 의해 평가되고, 효율적인 황삭가공이란 소재제거율의 극대화를 통한 가공시간의 최소화로 볼 수 있다. 이를 위해서는 가) 사용공구의 최적선택, 나) 공구 들림수를 최소화 할 수 있는 공구경로, 다) 이송속도의 조절을 통하여 소재제거율을 높이는 방안이 강구되어야 하며, 과거에 수행된 많은 연구가 있다.

기존의 연구를 살펴보면, 대부분의 연구는 3축가공에 국한되고 있으며^[2,5], 공구의 자세변화가 가능한

4축 이상의 가공을 대상으로 한 연구는 소수에 불과하다^[6]. 특히, 본 연구에서 다루고자 하는 저축화 환경, 즉 3축의 CNC에 부가테이블을 장착함으로써 가공에 요구되는 동시제어축 보다 적은 기계환경에서의 황삭알고리즘에 관한 연구는 전무한 상태이다. 본 연구팀에서는 이전에 3축 CNC에 인덱싱 테이블을 장착한 부가축 환경에서 임펠러와 같은 5축형상을 가공할 수 있는 하드웨어환경을 구현한 바 있으며, 정상 경로 알고리즘을 개발하고 유효성을 실제가공을 통하여 검증한 바 있다^[1]. 이러한 환경에서는 공구의 자세가 공작물의 셋업을 통해 이루어 지기 때문에 셋업횟수의 최소화가 가공의 효율성을 좌우하는 주요 문제로 대두되며, 이는 황삭가공에서도 마찬가지이다.

본 연구는 인덱싱 방식에 의한 부가축환경에서 뿐만 아니라, 공구의 자세가 연속적으로 변화될 수 있는 일반적인 4축 이상의 다축가공환경에서 직면하는 황삭가공문제를 대상으로, 전체가공시간을 최소화

*포항공과대학교 산업공학과
**중신회원, 포항공과대학교 산업공학과
***학생회원, 포항공과대학교 산업공학과

할 수 있는 효율적인 알고리즘에 관한다. (일반적인 다축환경과 인덱싱에 의한 부가축환경과의 차이는 셋업변경시간의 차이에 있으며, 이는 비용함수의 조절을 통하여 같은 알고리즘을 적용할 수 있음을 주긴 한다.) 근본적으로, 기존의 황삭경로 알고리즘에 비해 본 연구에서 다루는 문제와의 차이는 공구자세의 변경을 고려하는 것으로 볼 수 있으며, 공구자세에 따라 가공가능영역이 변하기 때문에 전영역을 커버하는 최소자세 결정문제가 주요 논점으로 부각된다.

본 논문에서는 이 문제와 더불어 황삭가공의 기본적인 문제인 공구크기 선정, 공구교환횟수, 공구경로 산출 문제를 통합적인 차원에서 최적화를 기할 수 있는 방식을 다음과 같이 단계별로 접근한다: 가) 주어진 곡면의 3차원 convex hull 오퍼레이션을 통한 간섭가능영역 탐색, 나) 간섭가능영역을 대상으로 network graph 이론과 branch and bound 기법을 이용하여 가공시간을 최소화 할 수 있는 다수의 공구규격 및 공구자세를 도출하고, 다) 선정된 공구자세 및 공구크기에 따른 가공영역의 결정 및 황삭경로를 산출하고, 라) 최대 절삭력 범위내에서 이송속도를 극대화할 수 있는 이송속도를 조정한다.

2. 간섭가능성에 따른 가공영역 구분

2.1 간섭가능영역 및 간섭미발생영역 산출

황삭가공시 전체 가공영역은 공구 크기에 의한 공구몸체간섭 가능성에 따라 간섭이 발생할 수 있는 영역(간섭가능영역)과 간섭이 발생하지 않는 영역(간섭미발생영역)으로 구분되어 질 수 있다. 일반적으로 간섭가능영역은 가공형상이 함몰된 지역에 존재하며, 간섭미발생 영역은 함몰된 지역을 제외한 가공영역에 존재한다. 예컨대, 그림 1에서 a영역은 공구 t1과 자세 o1에 의하여 전체를 가공하는 것이 가능하나, 공구 및 자세 (t1, o2), (t2, o1), (t2, o2)에

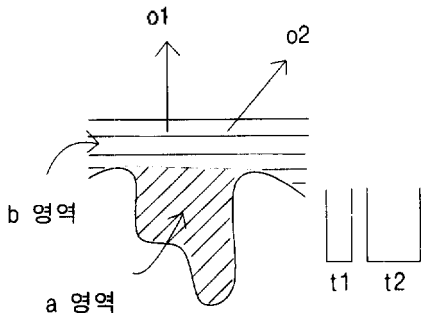


그림 1. 간섭가능성에 따른 가공영역의 구분.

서는 공구몸체간섭에 의해 전체영역을 가공하는 것이 불가능함을 보여준다. 반면, b 영역은 공구크기와 자세에 관계없이 가공 가능하기 때문에 간섭미발생영역으로 분류한다.

간섭가능영역 및 간섭미발생영역은 오일러 연산(Euler operation)을 이용하여 구할 수 있다: 1) 가공형상의 볼록면체(convex hull)를 생성한 후, 2) 가공형상과 볼록면체를 이용한 오일러 연산으로 간섭가능 영역을 3) 초기피삭재와 볼록면체를 피연산자로 하여 간섭미발생영역을 설정할 수 있다(식 1).

$$\begin{aligned} \text{간섭가능영역} &= \text{볼록면체} \ominus \text{가공형상} \\ \text{간섭미발생영역} &= \text{초기피삭재} \ominus \text{볼록면체} \quad (1) \end{aligned}$$

볼록면체의 생성은 가공형상을 폴리헤드론 모델로 근사화한 후 폴리헤드론모델을 구성하는 각각의 폴리곤의 모든 모서리점을 추출한 후, 추출한 3차원상의 점집합을 입력으로 하여 divide-and-conquer type 알고리즘^[7]을 이용하여 가공형상에 대한 볼록면체를 모델링한다. 오일러 연산은 피연산자 형상의 복셀화(voxelization)를 이용하여 구현하였다^[8]. 간섭가능영역 및 간섭미발생영역 산출 세부과정은 다음과 같이 요약된다.

- 단계 1. 가공형상을 폴리헤드론 모델로 형상화한다.
- 단계 2. 가공형상의 폴리헤드론 모델에서 모든 폴리곤에 대한 모서리점을 추출한 후, 추출된 3차원 점들을 둘러싸는 점집합을 구하고, 구한 점집합을 연결하여 볼록면체의 폴리헤드론 모델을 생성한다.
- 단계 3. 초기피삭재, 가공형상 및 볼록면체의 폴리헤드론 모델을 복셀화한다.
각 폴리헤드론 모델 내부에 속하는 복셀은 1로 하되, 복셀크기는 정삭여유량과 주어진 공구크기를 고려하여 결정한다.
- 단계 4. 식 (1)를 이용하여 간섭가능영역과 간섭미발생영역을 구한다.

위와 같이 가공영역을 구분하는 것은: 가) 공구크기 및 자세산출시 대상지역을 전체가 가공영역에서 간섭가능영역으로 축소시킬 수 있으며, 나) 간섭미발생영역에 대해서는(주어진 공구집합 중) 가장 큰 공구를 이용함으로써 소재제거율을 극대화 할 수 있다.

2.2 간섭가능영역의 세분화

간섭가능영역은 볼록면체와 가공형상이 맞닿는 경계면에 의해 한개 또는 다수의 독립영역으로 구분될 수 있으며, 각 독립영역들은 형상의 특징에 따라

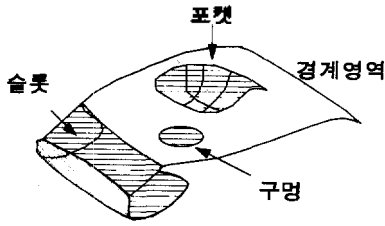


그림 2. 간섭가능영역의 세분화.

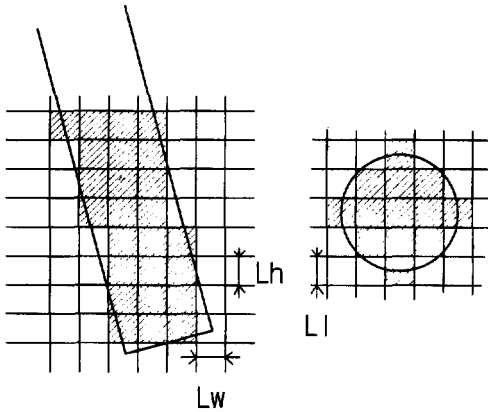


그림 3. 절삭영역의 이산화.

스텝, 포켓, 슬롯, 구멍등으로 분류할 수 있다(그림 2). 세분화된 독립영역에 대하여 형상의 특징에 따른 공구경로를 생성함으로써, 전체 간섭가능 영역에 대한 일괄된 공구경로를 생성하는 것보다 효율적으로 공구경로를 생성할 수 있다.

3. 공구크기와 자세에 따른 절삭 및 미절삭 영역 산출

간섭가능영역은 복셀의 집합으로 표현되며, 각 복셀은 일정한 부피를 지닌 단위영역이 된다. 간섭가능영역에 대한 가공가능성은 단위영역별로 모든 공구크기 및 자세에 대한 검색형태로 이루어 진다. 단위영역을 기본으로 하는 것은 가공불륨의 이산화를 위한 것으로서, 그림 3과 같이 단위영역의 간격으로 인한 오차를 감수할 수 밖에 없다. 이 오차는 단위간격을 줄임으로써(메모리의 증가와 trade-off) 줄일 수 있고, 단위영역 안쪽으로 들어오는 미세영역과 바깥쪽으로 나가는 미세영역이 평균적으로 같다는(그림 3) 매크로 한 관점에서 본다면 큰 문제는 아니라고 볼 수 있다.

각 단위영역에 대한 가공가능성 여부는 1 또는 0에 의해 표현이 가능하다. 이는 모든 공구, 자세 및 단위

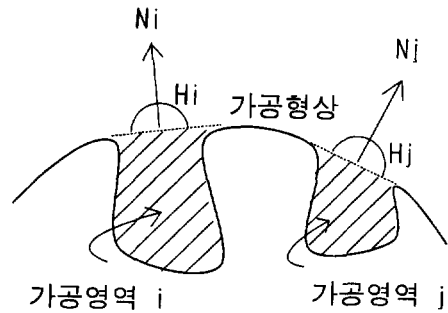


그림 4. 접근가능자세 예.

영역의 조합에 대해 이진값으로 표현하고 VMT (Volume Machinability Table)의 형태로 구체화시킬 수 있다. 이하에서는 접근가능자세의 산출 및 VMT의 생성방법을 기술한다.

3.1 접근가능자세의 산출

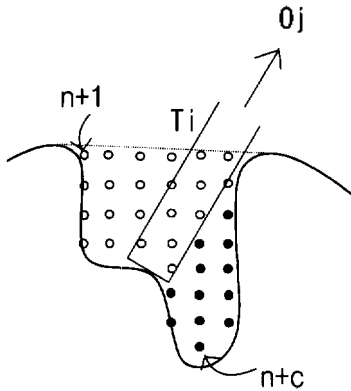
접근가능자세 집합은 모든 가능한 공구자세 집합의 부분집합으로 간섭가능영역에 접근할 수 있는 자세집합을 뜻한다. 그림 4는 간섭가능영역에 대한 접근가능자세 집합의 예로서, 다음의 과정을 거쳐 단위구 (unit sphere)상에 표현할 수 있다.

- 단계 1. 간섭가능영역에 포함된 복셀 중 간섭미발생 영역과 접하는 복셀들을 찾고, 그 중심점을 구한다.
- 단계 2. 구해진 중심점에서 표면에 수직인 근사화된 법선벡터를 구한다.
- 단계 3. 법선 벡터를 중심으로 하는 단위 반구 (unit hemisphere)를 구한다.
- 단계 4. 단위반구들의 합집합을 접근가능자세 집합으로 한다.

여기서 주의할 것은 가능한 모든 접근가능자세에 대해서 VMT 를 구축하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 접근가능자세 영역을 일정한 간격으로 이산화하여 VMT 구축을 위한 공구자세 집합으로 사용하였다. 이산화 간격이 작아지면, 정밀도가 증가하는 반면 계산량이 증가하므로, 본 연구에서는 가공형상의 복잡도를 고려하여 휴리스틱하게 이산화 간격을 설정하였다.

3.2 간섭가능영역에 대한 VMT의 생성

VMT는 개념적으로 공구, 자세, 간섭가능영역을 인덱스화하여 3축 좌표계에 1 또는 0으로 표기한 3차원 행렬로 볼 수 있다. 예를들어 공구 i가 공구자세 j를 취하여 가공단위영역 k가 가공가능하면 $VMT(i, j, k)$



(T_i, O_j)

k	n+1	n+2	n+3	n+4	...	n+a	n+h	n+c
EBMT(i, j, k)	1	1	1	1	...	0	0	0

그림 5. VMT(i, j, k)의 결정.

=1, 그렇지 않으면 0이다. 모든 조합에 대해 생성된 VMT는 이후의 최적화 과정에서 필요한 정보를 제공하며, 기본적으로 가) 자세 및 공구에 따른 가공가능성 여부와, 나) 가공가능한 단위영역의 갯수를 조사함으로써 가공가능한 부피 MV(machinable volume)를 쉽게 구할 수 있다(식 (2)).

$$MV(i, j) = dV * \sum_{k=1}^1 VMT(i, j, k) \quad (2)$$

여기서 dV는 단위가공영역의 부피를 나타낸다. VMT(i, j, k)의 생성은 다음의 절차로 요약된다(그림 5참조).

- 1) for $\forall t_i, t_i \in \{tool\}$
- 2) for $\forall o_j, o_j \in \{\text{접근가능자세}\}$
- 3) 자세 O_j 를 (ϕ, θ) 값으로 환산한 후, $(-\phi, -\theta)$ 만큼 형상을 회전한다. 공구자세는 z 축과 동일한 $(0, 0, 1)$ 이 된다.
- 4) x, y 평면상에 투영된 가공영역의 최대 x, y값 (max_x, max_y) 와 최소 x, y (min_x, min_y) 값을 계산한다.
- 5) 최대, 최소범위내에서 일정한 간격으로 x, y값을 증가하면서 공구를 위치시킨다.
- for $\forall x, x \in \{x | x = max_x + u * (max_x - min_x), 0 \leq u \leq 1\}$
- for $\forall y, y \in \{y | y = max_y + v * (max_y - min_y), 0 \leq v \leq 1\}$
- 6) 위치 x, y에서 가공형상과 간섭이 발생하지 않

는 최소높이 z를 찾고 현재위치로 $P(x, y, z)$ 로 한다.
 7) 단계 6)에서 찾아진 연속한 두점 P_1, P_2 사이를 지나는 공구이동볼륨(swept volume)과 만나는 단위 영역에 대해 VMT값을 1로 설정한다. 즉,

$$VMT(i, j, k) = 1, \text{ if 단위영역}(k) \in SW(P_1, P_2)$$

여기서 $SW(P_1, P_2)$ 는 두점 P_1, P_2 사이의 공구이동 볼륨이다.

4. 최적자세 및 공구셋 산출

최적자세 및 공구셋은 M개의 공구와 N개의 공구 자세가 주어진 경우: 가) 간섭가능 전영역을 제거하는 가공시간과, 나) 공구교환시간 다) 공구자세변경 시간과, 라) 황삭가공후 남은영역을 중삭 또는 정삭 공구로 가공할 때 필요한 가공시간의 합을 최소화 하는 공구 및 자세로 정의할 수 있다. 따라서, 황삭 가공의 최적화문제는 수행도 지표 식(3)을 최소화하는 공구집합과 공구자세집합을 구하는 것이다. 가공 시간은 가공영역의 부피와 소재제거율값에 의해 근사화되어 산출된다. 소재제거율은 Machining Data Handbook^[11]에서 제시되는 수치를 이용한다.

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^m \left[\frac{\sum_{j=1}^n \alpha_{ij} * MV(i, j)}{MRR(i)} \right] + \text{Min}(1, \text{Max}(\sum_j \alpha_{ij}, 0)) * dT + \sum_j \alpha_{ij} * dO + \beta * UV \right\} \quad (3)$$

where

α_{ij} : 1, if tool i, orientation j is used
 0, otherwise

dT : Tool change time

dO : Setup change time

UV : Uncut volume

β : Uncut volume에 대한 중삭시간고려 weight

식 (3)은 비선형 문제로서 분석적 방법에 의해서 직접 정확한 해를 구하기가 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 실용적인 측면을 강조하여 식 (3)을 선형 될 공구 및 자세 수에 따라 네가지의 문제로 세분화 하여 접근하였다: 가) 한 공구와 한 자세를 선정하는 경우, 나) 한 공구와 다수 자세를 선정하는 경우, 다) 다수 공구와 한 자세를 선정하는 경우, 라) 다수 공구

와 다수 자세를 선정하는 경우, 본 연구에서는 라) 문제를 제외한 3개 문제에 대한 접근방식을 제시한다.

4.1 한공구, 한자세 산출

한공구, 한자세의 사용은 가공시 공구교환 및 자세변경이 발생하지 않는다. 따라서 식 (3)에서 공구교환요소 및 자세변경요소를 고려하지 않아도 되며, 이는 식 (3)을 아래와 같이 단순화시킨다.

$$\text{Min} \left\{ \frac{MV(i, j)}{MRR(i)} + \beta * UV \right\} \quad (4)$$

식 (4)는 공구집합 및 자세집합에 포함된 각 원소들의 조합(I, j)에 대해, 1) 전체가공시간을 계산하고 (T(i, j)), 2) 최소가공시간을 갖는 I*, J*를 찾는다. 이때, I*, J*는 구하고자 하는 최적공구 및 자세가 된다.

4.2 다수 공구, 한 자세 산출

고정된 공구자세에서의 처리할 수 있는 미절삭영역은 공구 크기 간섭으로 인하여 접근할 수 없는 영역이다. 이런 미절삭영역은 보다 작은 공구를 사용하여 제거될 수 있다. 미절삭영역을 제거하기위해 공구 i를 사용한 후 공구 j를 사용할 때 걸리는 시간은 식 (5)에 의해 표현되어진다.

$$\text{Min} \left\{ \sum_{i=1}^n \left[\frac{\alpha_{i,j} * MV(i, j)}{MRR(i)} \right] + \text{Min}(1, \text{Max}(\sum_j \alpha_{i,j}, 0)) * dT + \beta * UV \right\} \quad (5)$$

공구 i와 공구 j사이의 가공시간 관계는 DAG(Directed Acyclic Graph)¹⁰⁾로 표현할 수 있다(그림 6). node(i)는 공구 i의 사용을 의미하고, arc(i, j)는 공구 i 사용 후 남은 영역을 공구 j를 사용하여 가공할 때 걸리는 공구교환시간을 포함한 가공시간을 나타낸다. Arc의 방향은 공구 사용순서를 의미한다. 따라서 arc의 방향은 직경이 큰 공구에서 작은 공구로 향하게 된다.



- node(i) = Tool i
- arc(i, j) = 공구교환 + 가공시간

그림 6. 공구 i와 공구 j관계.

고정된 공구자세에서 공구수가 M개인 경우 공구사이의 가공시간 관계는 그림 7과 같이 DAG로 표현된다. 여기서 node(S)는 공작물의 초상태를 의미하고, node(F)는 정삭(또는 중삭)가공 전의 상태를 의미한다. 따라서 고정된 공구자세에서의 최소 가공시간을 가지는 공구셋은 node(S)에서 node(F)를 연결하는 최단경로상에 존재하는 node들이 된다.

따라서 다수 공구와 한 공구자세 선정방법은 가) 우선 주어진 모든 자세에 대해 위에서 제시한 DAG를 이용하여 최소 가공시간을 가지는 최적 공구셋을 구하고, 나) 다음 이들중 최소 가공시간을 가지는 공구자세 및 공구셋을 최적 자세 및 공구셋으로 한다. 구체적으로, 공구수가 M이고 자세수가 N인 경우, 최적 공구집합 및 한자세 선정은 각 자세마다 M개의 node를 갖는 그림 8과 같은 확장된 DAG를 작성

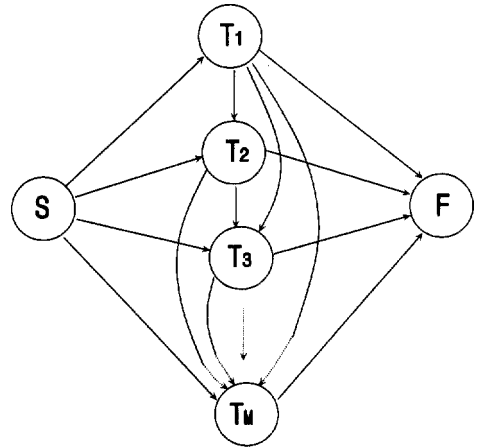


그림 7. 공구수 M 경우 형성된 DAG.

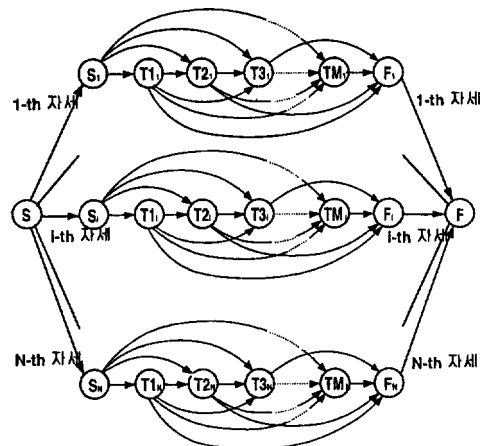


그림 8. 확장된 DA(공구수 M, 자세수 N).

하고, 확장된 DAG에서 최단경로를 탐색하는 것으로서, 다음과 같이 요약된다.

- 1) construct_extended_DAG
- 2) for all orientation j {
 - 2.1) find node(j , S) and node(j , F).
 - 2.2) extract the shortest path from node(j , S) to node(j , F) by applying the label setting method.
 - 2.3) calculate machining time T_j and tool set $\{i\}$,
- 3) find minimum T_j among all T_j , and set j^* and $\{i\}$, to optimal orientation and tool set.

4.3 한 공구와 다수 자세 선정

한 공구와 다수 자세를 선정과정은(다수 공구, 한 자세) 문제와 유사하게 가) 우선 주어진 모든 공구들에 대해 최소 가공시간을 가지는 최적 자세집합을 구하고, 나) 다음 이들 중 최소 가공시간을 가지는 공구를 구하여, 이를 최적 공구 및 자세들로 선정한다. 한 공구와 다수의 자세가 주어진 경우, 최소 가공시간은 식 (3)로부터 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\text{Min} \left\{ \left[\frac{\bigcup_{j=1}^n \alpha_{i,j} * MV(i, j)}{\text{MRR}(i)} \right] + \sum_j \alpha_{i,j} * dO + \beta * UV \right\} \quad (6)$$

식 (6)의 해법으로 본 연구에서는 다음과 같이 branch-and-bound 기법¹¹⁾을 적용하였다(그림 9).

- 1) 자세수 n 을 1로 하고, 전체자세집합 $O = \{o_1, \dots, o_n\}$ 를 초기화 한다.

- 2) n 개의 서로다른 원소로 구성되는 O 의 모든 부분집합 O_i^n 를 구한다.

$$O_i^n = \{o_1, \dots, o_n\} \quad i = 1, \dots, nC_n$$

where $O_i^n \subset O, o_1 \neq o_2 \neq \dots \neq o_n$

- 3) 2)에서 구해진 모든 O_i^n 에 대해 절삭영역을 산출하고 최대절삭영역을 갖는 O_{max}^n 를 찾는다.
- 4) 찾아진 O_{max}^n 에 대해 식 (8)를 이용하여 총가공시간 T_n 을 구한다.
- 5) $T_n > T(n-1)$ 이거나 $n = N$ 인 경우 Step 6로 간다. 아닌 경우 n 을 1 증가시켜 Step 2로 간다.
- 6) 찾아진 T_1, \dots, T_n 중 최소값을 가지는 n 을 찾고, O_{max}^n 를 최적자세집합으로 한다.

5. 공구경로 산출 및 이송속도 보정

공구경로는 제층방식을 사용하며, 각 계층(절삭평면)에 대해 지그재그 경로 형태를 취한다. 경로 생성은 4절에서 구해진 최적 공구 및 자세를 이용하며, 각 공구 및 자세에 따른 가공영역은 3절에서 구해진 VMT를 이용하여 인식한다. 이송속도는 경로상의 두 가공점을 단위로 하여 보정되며, 표준 소재제거율을 기준값으로 한다.

5.1 공구경로 산출

공구 및 자세공구경로산출시 가공영역의 인식이 선행되어야 한다. 공구 i , 자세 j 가 주어졌을 때 가공가능한 영역의 인식은 VMT를 통하여 용이하게 산출된다. 인식된 가공영역에 대한 공구경로산출 과정을 요약하면 그림 10와 같다: 1) $MV(i, j)$ 에 대해 자세방향으로 최고점과 최저점을 구하고, 2) 자세방향으로

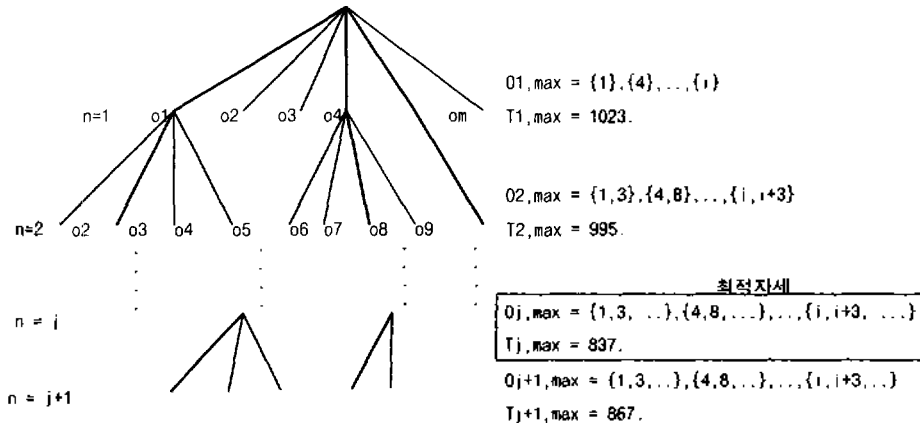


그림 9. 최적자세집합 선정 과정.

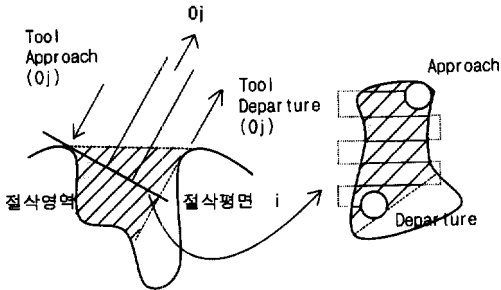


그림 10. 공구경로 산출.

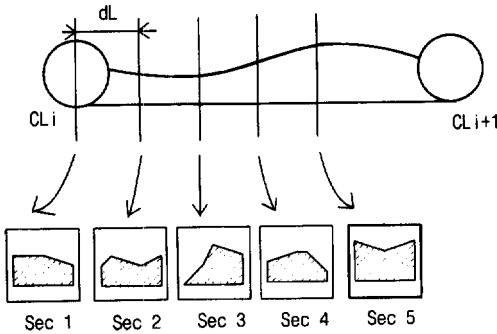


그림 11. 가공점상이의 절삭폭 산출.

법선으로 하는 절삭평면을 구하여, 최고점부터 최저점까지 절삭깊이만큼 아래로 이동하면서, 3) 각각의 절삭평면에 대해 지그재그 형태의 경로를 생성한다.

5.2 이송속도 보정

이송속도보정은 두 가공점사이에서 발생하는 최대절삭력을 기준으로 보정한다. 절삭력은 두 가공점사이에서 공구방향으로의 수직절단면의 면적값을 이용하여 근사화한다. 이는 평균절삭력과 소재제거율이 비례하고, 소재제거율은 절삭폭과 절삭거리에 의해 산출되므로, 순간절삭력은 순간소재제거율, 즉 절삭폭에 의해 표현될 수 있기 때문이다. 그러나 두 가공점사이의 모든 순간에 대한 절삭력산출은 불가능하므로, 두 가공점사이를 이산화하고 이산된 각 지점에서의 절삭력을 구한다. 산출된 절삭력의 범위가 큰 경우 두 가공점을 분할하여 새로운 가공점을 생성하여 미세 보정을 한다. 그림 11은 이산된 각 지점에서의 절삭력 산출과정을 보여준다.

- 1) CL_{i+1} 과 CL_i 를 연결하는 단위벡터(\vec{e}_0)를 구한다.
- 2) CL_{i+1} 과 CL_i 사이에 k 를 법선벡터로 하는 평면을 일정한 간격으로 위치시킨다.
- 3) 위치된 평면과 접하는 가공단위영역들을 평면에 투영시킨 후, 투영된 면적을 구한다.

표 1. 입력공구 데이터

공구 집합	1	2	3	4	5	6
반지름(mm)	8.0	7.0	6.0	5.0	4.0	3.5
MRR(mm ³ /min)	256	196	144	100	64	49



(a) 초기형상 (b) convex 형상 (c) 간섭가능영역

그림 12. 간섭영역 추출.

4) 각 평면상에서 구해진 면적중 최대값과 최소값을 구한다.

식 (8)는 최대 면적을 이용하여 이송속도를 보정하는 것을 나타낸다.

$$t_{new} = \frac{\max S^*d}{MRR_{ref}}, f_{new} = \frac{d}{t_{new}} \tag{8}$$

where

d : CL_{i+1} 과 CL_i 사이 거리

t_{new} : 보정 후 이송시간

6. 시뮬레이션 검증

본 연구에서 제시된 알고리즘의 효율성 검증을 위해 임펄러형상을 사용하였으며, 검증에로서 한자세, 다수공구에 대한 해를 제시하였다. 사용공구수는 6개로 하였으며, 초기자세범위는: [0, 90], [0, 360]으로 지정하였다. 표 1은 각 공구에 대한 반지름 및 소재제거율을 보여준다.

초기형상 및 공구가 입력되면, 초기형상으로부터 간섭가능영역을 추출한다. 그림 12은 부셀로 모델링된 임펄러 두 날개, convex 형상, 그리고 추출된 간섭가능영역을 보여준다.

추출된 간섭가능영역에 대해 가공가능성 여부를 나타내는 VMT 를 작성한다.(다수공구, 한자세)문제에 대해서 VMT로부터 각 자세에 대한 DAG 를 작성하고, 각각의 DAG에 대해 최단 경로를 찾고, 전체 가공시간을 산출한다. 그림 13은 생성된 DAG의 한 예를 보여준다. 이때 공구교환시간 dT는 30초로 하였다.

각각의 자세에 대해 찾아진 최단경로 및 전체가공시간중 최소시간을 갖는 공구자세는 (90, 0)이며 이

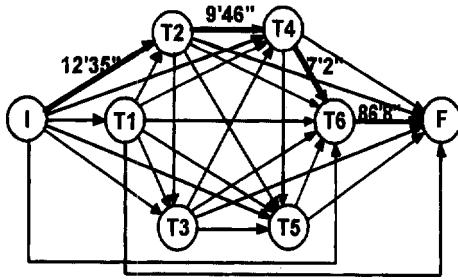


그림 13. 자세 (90, 0) 일때의 DAG와 최단경로.

표 2. 다수공구, 한자세 시뮬레이션 결과

	가공시간 (황삭, 중 공구)	사용 사용자세 (ϕ, θ)	절삭부피 (mm^3)	미절삭 부피
다수공구 한자세	29분 25초,	2, 4, 6 (3개)	(90, 0)	3598.8 782

때 공구셋은 (2, 4, 6)이 산출(그림 13) 되었으며, 그 결과를 요약하면 표 2와 같다.

다음 그림 14는 위의 결과에 대한 시뮬레이션된 결과를 보여준다. 공구크기에 따라 순차적 가공이 진행되면서 절삭할 수 있는 부분과 최종적으로 남은 부분을 보여준다.

표 3은 (한공구, 한자세) 선정 및 (한공구, 다수자세) 선정 결과를 보여준다. 여기서, 공구자세변경 시간을 30초로 하였다.

제시된 알고리즘의 효율성을 비교하기 위해(한공구, 한자세) 선정시와(다수공구, 한자세) 선정 및 (한공구, 다수자세) 선정시의 결과를 비교하였다. 한공구, 한자세 사용시에 비해 다수공구, 한자세 사용시 황삭가공시간은 한공구, 한자세사용에 비해 15.8% 만큼 감소되었으며, 또한 미절삭영역은 한공구, 한자세사용시에 비해 145.8 (mm^3)만큼 줄어들어 중삭가공시간도 단축시킬 수 있었다. 다수자세, 한공구사용시는 한자세, 한공구사용시에 비해 황삭가공시간은 증가되었으나, 황삭 후 미절삭영역의 감소로 중삭시간이 20분 정도 단축되었으며, 전체적으로 18분 가량의 가공시간이 단축되었다.

7. 결 론

본 연구에서는 다수 공구 다수 자세를 가지는 다축가공을 대상으로 가공시간을 최소화할 수 있도록 공구셋 결정, 공구자세 선정 및 공구경로 산출에 관한 황삭 알고리즘을 제시하였다. 공구셋 및 공구자세 선정 문제는(한공구, 한자세), (한공구, 다수자세),

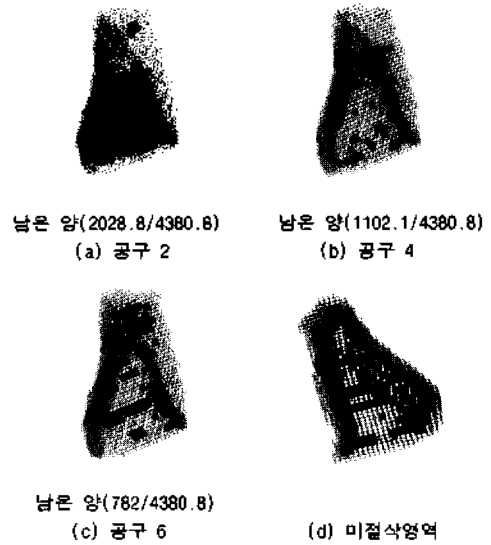


그림 14. 다수공구 사용시 절삭영역.

표 3. 한공구/한자세, 한공구/다수자세 시뮬레이션 결과

	가공시간 (황삭/중 공구)	사용 공구	사용자세 (ϕ, θ)	절삭 부 피(mm^3)	미절삭 부피
한공구 한자세	35분 02초/	4	(90, 0)	3453	927.8
한공구 다수자세	37분 59초/89분	4	(90, 0) (30, 0)	3643	737.8

(다수공구, 한자세), (다수공구, 다수자세)의 문제로 세분화하여 접근하였으며, (한공구, 한자세), (한공구, 다수자세), (다수공구, 한자세)에 대한 해법을 개발하였다. 제시된 알고리즘은 부가축 환경 뿐만 아니라 다축 환경(3, 4, 5축을 모두 포함하는)에도 바로 적용될 수 있다. 따라서, 3, 4, 5축에 공통적으로 적용할 수 있는 황삭 알고리즘이 전무한 상태에서, 본 연구는 이 분야의 이론적인 기반을 제시하리라 기대 된다.

참고문헌

- Suh S.H. and Lee, J.J., "Five-axis part machining with three-axis CNC machine and indexing table", to appear in *ASME J. of Manufacturing Science and Engineering*.
- Mizugaki, Y., Hao, M., Sakamoto, M. and Makino, H., "Optimal Tool Selection Based on Genetic Algorithm in a Geometric Cutting Simulation", *Annals of the CIRP*, 43(1), pp. 433-436, 1994.
- Bala, M. and Chang, T.C., "Automatic cutter selec-

tion and optimal cutter path generation for prismatic parts", *International Journal of Production Research*, Vol. 29, No. 11, pp. 2163-2176, 1991.

4. Lee, Y.S., Choi, B.K. and Chang, T.C., "Cut distribution and cutter selection for sculptured surface cavity machining", *International Journal of Production Research*, Vol. 30, No. 6, pp. 1447-1470, 1992.
5. Lee, K.W., 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.
6. Suzuki, H., Kuwano, Y. and Goto, K., "Development of the CAM System fro 5-Axis Controlled Machine Tool", *日本精密工學會誌*, Vol. 60, No. 6, pp. 832-836, 1994.
7. Preparata, F.P., Shamos, M., *Computational Geometry An Introduction*, Springer-Verlag, pp. 135-140, 1985.
8. Cohen, D. and Kaufman, A., "Scan-Conversion Algorithms for Linear and Quadratic Objects", *IEEE*, pp. 280-301, 1991.
9. Murty, K.G., *Network Programming*, Prentice Hall, pp. 251-255, 1992.
10. Luger, G.F. and Stubblefield, W.A., *Artificial Intelligence and the Design of Expert Systems*, The Benjamin/Cummings Pub., pp. 165-170, 1989.
11. *Machining Data Handbook*, Machinability Data Center, 1972.



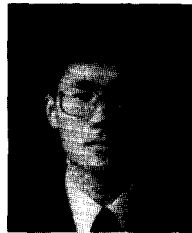
강 지 훈

1994년 포항공대 산업공학과 학사
 1996년 포항공대 산업공학과 석사
 1996년 ~ 현재 LG 생산기술원 CAD/CAM 그룹
 관심분야 : CAD/CAM, NC가공, 생산시스템



서 석 환

1976년 고려대학교 산업공학과 학사
 1978년 한국과학기술원 산업공학과 석사
 1986년 Ohio State University 공학박사
 1986년 ~ 1987년 University of Michigan 통합생산연구소 연구원
 1987년 ~ 현재 포항공과대학교 산업공학과 부교수
 관심분야 : Computer Automated Manufacturing, NC가공, CNC 제어시스템 (<http://camlab.postech.ac.kr>)



이 정 재

1988년 고려대학교 산업공학과 학사
 1992년 포항공과대학교 산업공학과 석사
 1997년 포항공과대학교 공학박사
 1997년 ~ 현재 University of Waterloo 연구원
 관심분야 : CAD/CAM, NC가공, CIM System.