

특징형상을 이용한 절삭가공부품의 가공순서 자동생성

우윤환*, 강상욱¹

¹한성대학교 기계시스템공학과

Automatic Generation of Machining Sequence for Machined Parts Using Machining Features

Yoonhwan Woo^{*}, Sangwook Kang¹

¹Department of Mechanical Systems Engineering, Hansung University

요약 3차원 솔리드모델링이 일반화되면서 이를 이용한 여러 응용이 가능해졌으며, 가장 대표적인 응용분야인 CAM과의 통합을 위한 다양한 연구가 진행되어왔다. 그 결과 설계된 부품의 CAD모델로부터 실제가공에 필요한 특징형상을 자동으로 인식하는 기술들이 개발되었다. 하지만 이러한 방법으로 인식된 특징형상들을 이용하여 절삭가공순서 등을 자동으로 생성하기 위해서는 고려하여야 할 가공순서의 조합의 수가 너무 많아 이를 구현하기에는 현실적으로 문제가 발생한다. 이에 본 연구에서는 절삭가공에 관련된 규칙을 수집하고 이를 이용하여 특징형상 간 가공우선순위를 적용함으로써 고려하여야 할 조합의 수를 대폭 감소시키고, 이들 조합으로부터 효율성을 최대화 하는 가공순서를 결정하는 방법을 제안하였다. 또한 항공기 부품에 대한 테스트를 통하여 20개의 특징형상으로부터 가공시간이 적은 가공순서를 자동으로 생성할 수 있었다.

Abstract As 3D solid modeling prevails, a range of applications have become possible and intensive research on the integration of CAD/CAM has been conducted. As a consequence, methods to recognize the machining features from CAD models have been developed. On the other hand, generating a machining sequence using the machining features is still a problem due to a combinatorial problem with a large number of machining features. This paper proposes a new method that utilizes the precedence constraints through which the number of the combinations is reduced drastically. This method can automatically generate machining sequences requiring the lowest amount of machining time. An airplane part was used to test the usefulness of the proposed method.

Keywords : CAD/CAM integration, Feature recognition, Machining sequence, Precedence constraints, Volume decomposition

1. 서론

제품의 설계 및 제작 공정에 있어 컴퓨터의 응용은 진통적으로 분리되어 있던 두 분야에 많은 변화를 가져왔다. 설계분야에 있어 CAD의 사용은 제품의 형상모델링뿐만 아니라 다양한 공학적 해석을 가능하게 하였으며 CNC 공작기계로 대표되는 CAM은 보다 빠르게 정밀한 부품의 가공을 가능하게 함과 동시에 숙련된 기술자들이

경험에 의존하던 많은 부분을 대체하였다.

하지만 이러한 CAD와 CAM의 각 분야에 있어서 많은 발전이 있음에도 불구하고, 두 분야를 통합하는 데 있어서는 아직까지 부족한 부분이 많다. 대부분의 상용 CAD 프로그램들은 설계에 필요한 다양한 형상 템플릿을 제공한다. 설계특징형상(design feature)이라고 불리는 이러한 형상 템플릿으로는 보스(boss), 리브(rib), 패드(pad)와 같은 가법 특징형상과 포켓(pocket), 슬롯

본 논문은 한성대학교 교내학술연구비 지원과제임.

*Corresponding Author : Yoonhwan Woo (Hansung Univ.)

Tel: +82-2-760-4149 email: yhwoo@hansung.ac.kr

Received October 30, 2015

Revised December 7, 2015

Accepted February 4, 2016

Published February 29, 2016

(slot), 드릴링 홀과 같은 감법 특징형상들이 있다. 하지만 이러한 가법과 감법 특징형상들을 사용하여 생성된 CAD모델은 재료를 깎아내어 부품을 가공하는 절삭가공을 위한 모델로서는 적절치 않다. 절삭가공의 특성상 CAM을 위한 모델은 감법특징형상들만으로 표현되어야 이를 이용하여 NC코드를 생성할 수 있기 때문이다.

이러한 이유로 CAD 모델로부터 절삭가공특징형상 (Machining feature, MF)을 자동으로 인식할 수 있는 다양한 연구가 진행되었다 [1-7]. 대표적인 절삭가공특징형상 인식방법으로는 가공 원재료에서 완성된 부품의 볼륨의 차이인 델타볼륨(delta volume)을 분해하여 이를 절삭가공특징형상으로 인식하는 최대볼륨분해법 (maximal volume decomposition) [1-3] 과 해당부품으로부터 직접 절삭가공특징형상의 패턴을 찾아 이를 이용하여 특징형상을 인식하는 힌트기반인식법(hint-based recognition method) [4-7]이 있다. Fig. 1은 최대볼륨분해법으로 인식된 절삭가공특징형상의 예를 보여주고 있다.

여기서 문제는 인식된 절삭가공특징형상들이 가공에 이용될 최종특징형상이 아니라는 점이다. 최대볼륨분해법을 포함한 대부분의 특징형상인식방법은 하나의 특징형상이 다른 특징형상과 겹친다. 즉, 인식된 절삭가공특징형상의 가공순서에 따라 최종특징형상은 바뀌게 되고, 이에 따라 공정계획 및 공구경로가 달라져 가공시간 및 생산효율성 또한 달라진다.

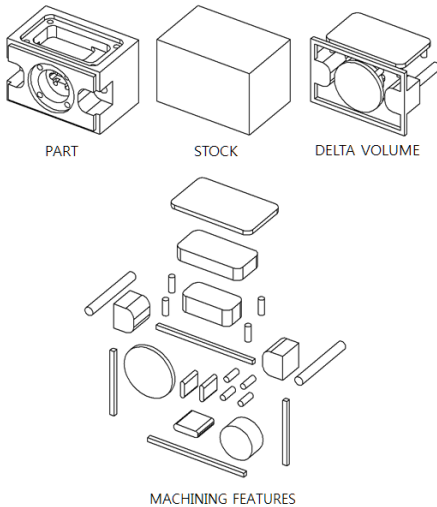


Fig. 1. A part and its machining features recognized by the maximal volume decomposition. The delta volume of the part is decomposed and recognized as 24 machining features.

예를 들어 Fig.2에서 2개의 인식된 절삭가공특징MF1과 MF2중 어느 것을 먼저 가공하느냐에 따라 서로 다른 가공작업이 가능하게 된다. 하지만 인식된 절삭가공특징형상들의 개수가 증가하면 이로부터 추론할 수 있는 가공순서의 조합의 수가 너무 많이 발생한다. 이론적으로 n 개의 절삭가공특징형상을 가진 부품의 경우 $n!$ 가공순서가 가능하며 공구의 접근방향까지 고려하면 이 수는 더 늘어나 이를 모두 고려하기에는 현실적으로 불가능하다.

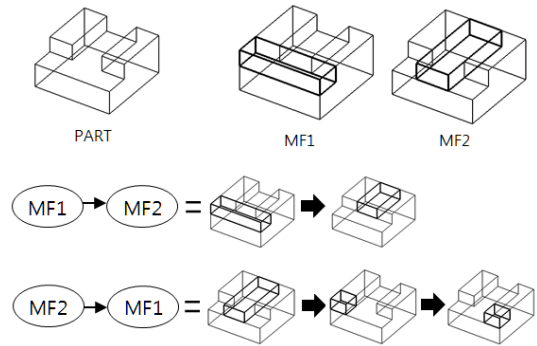


Fig. 2. Example of alternative machining sequences.

이에 본 논문에서는 3축 밀링머신을 이용하여 부품을 가공하는 경우에 있어 주어진 해당 부품의 절삭가공특징형상으로부터 가공순서의 경우의 수를 효과적으로 줄이고 이로부터 가장 효율적인 가공순서를 결정할 수 있는 방법을 제시하고자 한다. Fig. 3은 본 연구에 사용된 방법의 전체적인 아키텍처이다.

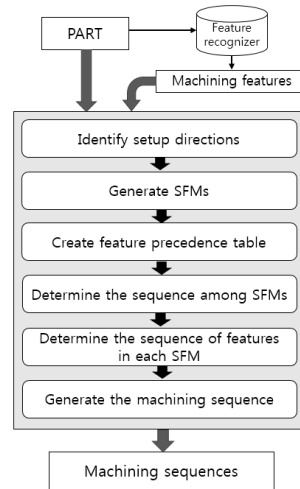


Fig. 3. Architecture of the system

2. 특징형상간의 가공우선순위

앞 절에서 언급한 바와 같이, 인식된 특징형상들을 이용하여 최적의 가공순서를 정하기 위해서는 고려해야 할 가공순서의 조합이 너무 많다. 또한 이러한 가공순서의 조합에는 적용 가능한 가공방법이나 현장의 여건 등을 고려할 때 의미 없는 조합들을 포함하고 있는 것도 사실이다.

이에 본 연구에서는 이러한 현실성 없는 가공순서와 정밀도등을 확보할 수 없는 가공순서들을 배제함으로써 고려하여야 할 조합의 수를 획기적으로 감소시키고 이들 조합으로부터 제작시간을 최소화 하는 가공순서를 결정하는 방법을 제안하고자 한다. 여기서 핵심 아이디어는 인식된 특징형상들 간에 가공우선순위를 부여함으로써 불필요하거나 비효율적인 다수의 가공순서를 배제하여 고려하여야 할 경우의 수를 최소화하였다. 우선순위를 부여하는 방법으로 본 연구에서는 다음과 같은 사항을 고려하였다.

- 셋업의 최소화
- 가공가능성
- 제작효율성

2.1 셋업의 최소화

셋업(set-up)은 가공하고자 하는 재료를 지그와 클램프 등을 사용하여 작업대에 고정하는 작업으로 그 특성상 상대적으로 많은 시간이 필요한 작업인 동시에 결과물의 정밀도에 영향을 미치는 중요한 과정이다. 따라서 셋업의 횟수를 최소화함으로써 가공시간의 단축하고 정밀도를 향상시킬 수 있다.

셋업의 횟수를 최소화하기 위해서는 먼저 각 특징형상을 가공하기 위해 공구가 접근할 수 있는 방향을 결정하여야 한다. 경우에 따라 하나의 특징형상은 복수개의 공구접근방향을 가질 수 있다. 예를 들어 Fig. 4에 있는 3개의 특징형상을 보면 MF1의 경우 두 개의 공구접근방향 Dir1과 Dir2가 가능하며, MF2와 MF3의 경우는 Dir3 하나의 공구접근방향만 가능하다. 3축 절삭가공기계로 해당 부품을 가공하는 경우 각각의 공구접근방향은 셋업방향으로 볼 수 있으나, 이 부품을 가공하기 위해서 3방향의 셋업이 모두 필요하지는 않다. 또한 Fig. 5에 있는 특징형상은 형상만 고려했을 경우 Dir1, Dir2 두 개의 공구접근방향이 가능하지만 실제 가공을 고려하면 스

핀들과의 간섭으로 인해 Dir2는 가능한 공구접근방향이 아니다. 따라서 부품과 가공기계와의 간섭등도 셋업 방향을 결정하는 데 있어 고려하여야 한다.

이에 본 연구에서는 각 특징형상의 공구접근방향으로부터 최소한의 셋업방향을 정하는 알고리즘을 개발하였으며 이에 대한 자세한 내용은 다음 절에서 설명한다.

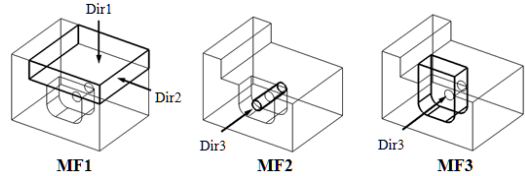


Fig. 4. Cutter approach directions. The cutter approach directions are the identical to the set-up directions for the 3-axis milling machine.

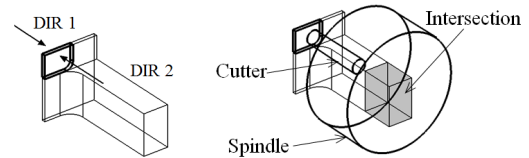


Fig. 5. Consideration of machine-part intersection in determining setup directions.

2.2 가공가능성에 따른 우선순위

두 번째로 가공가능성(machinability)에 따른 우선순위를 고려하였다. 서로 겹쳐 있는 특징형상들의 경우 정밀도 확보 및 가공가능성 등으로 인해 특징형상들 간 우선순위가 발생하게 된다.

예를 들어 Fig. 6의 첫 번째에 있는 부품의 경우, 경사면에 드릴로 구멍을 가공하게 되면 경사면으로 인한 드릴공구의 휨으로 인하여 정확한 가공이 어려울 수 있다. 이를 방지하기 위해서는 MF2를 MF1보다 먼저 가공하는 것이 바람직하다. Fig. 6의 두 번째 부품의 경우에는 카운터보어 특징형상인 MF1을 드릴링 홀 특징형상인 MF2에 앞서 가공하여야 하며, 세 번째 부품의 경우 MF2는 공구의 직경대비 제거하여야 할 재료의 깊이가 너무 깊어 정밀한 가공이 불가능하므로 MF1을 먼저 가공하여야 한다. 가공가능성을 고려한 우선순위는 도식적으로 실선화살표로 표시되며, 반드시 준수하여야 할 조건이다.

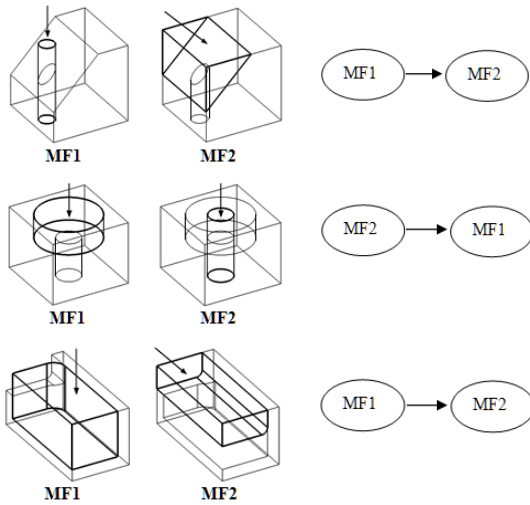


Fig. 6. Examples of precedence constraints with considerations of machinability.

2.3 제작효율성에 따른 우선순위

세 번째로 특정 형상간의 가공우선순위를 제작효율성 (manufacturing efficiency) 면에서 가공시간을 단축할 수 있는 방법들을 수집하고 이를 고려하였다.

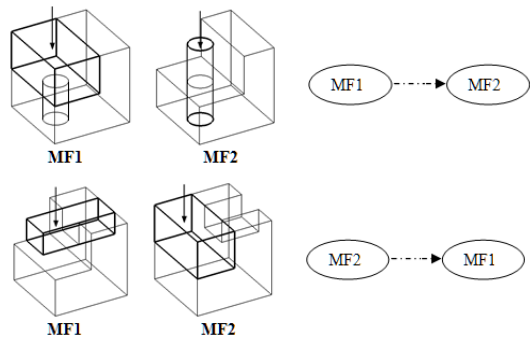


Fig. 7. Examples of precedence constraints with consideration of manufacturing efficiency.

Fig. 7의 첫 번째 부품에서 두 개의 특징형상의 경우를 보면 MF2를 먼저 가공하더라도 MF1을 가공시간을 단축할 수는 없다. 하지만 MF1을 먼저 가공하게 되면 드릴링 홀인 MF2의 깊이가 작아져 가공시간을 단축할 수 있게 된다. 또한 본 연구에서는 가공에 따른 특징형상의 외곽형상의 변화를 고려하여 우선순위를 부여하였다. Fig. 7의 두 번째 부품의 경우 MF1을 먼저 가공하여도 MF2의 높이는 변함이 없는 반면, MF2를 먼저 가공하면

MF1의 길이가 감소하게 된다. 이러한 외형변화는 바운딩박스(bounding box)를 이용하여 판단하였다.

특징형상이 서로 겹치지 않거나, 겹치더라도 우선순위를 적용할 수 없는 경우, 또 어떤 것을 먼저 가공하더라도 다른 상관이 없는 경우에는 더 큰 공구로 가공할 수 있는 특징형상에 우선순위를 부여하였다.

제작효율성에 따른 우선순위는 도식적으로 일점쇄선 화살표로 표시되며, 가공가능성 우선순위와 같은 다른 우선순위조건과 상충될 경우 준수하지 않을 수도 있다.

3. 가공순서의 결정

앞서 기술한 방법에 의해 각 특징형상의 공구접근방향과 특징형상들 간의 가공우선순위가 정해지면 다음의 방법으로 가공순서를 결정한다.

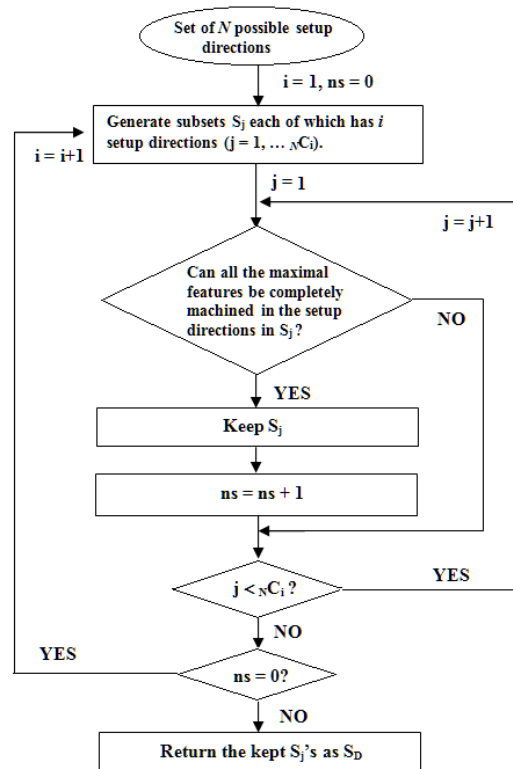


Fig. 8. Algorithm for determining the sets of minimum set-up directions.

1. 셋업의 횟수를 최소화하는 공구접근방향을 결정한다.

부품에 따라 셋업을 최소화하는 방향의 수는 여러 개가 가능할 수 있으며, 본 연구에서는 Fig. 8에 있는 알고리즘에 의해 셋업을 최소화하는 방향들의 집합을 결정하였으며 이 들 집합을 S_D 라 정의하였다. 하나의 부품이라도 복수개의 S_D 가 가능하다. 예를 들어 Fig. 3에 있는 부품의 경우 본 알고리즘에 의해 결정된 S_D 는 {Dir1, Dir3}, {Dir2, Dir3} 두 개다.

2. 결정된 S_D 에 따라 특징형상들을 셋업방향별로 분류한다.

각 셋업방향별로 분류된 특징형상들의 집합을 셋업기반특징형상모델 (Setup-based Feature Model, SFM)이라 부르며 Fig. 4에 있는 부품의 SFM은 Fig. 9에 보인 바와 같다. 해당 부품은 두 개의 S_D 가 있으므로 두 개의 SFM이 생성된다.

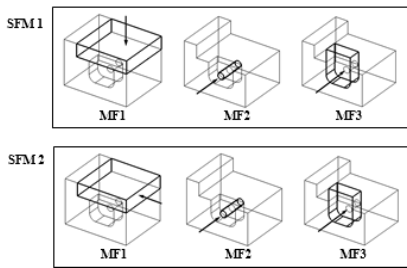
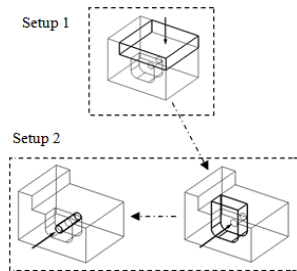


Fig. 9. Setup-based feature models for the part shown in Fig. 4.

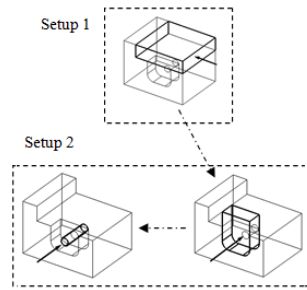
3. 특징형상 간 가공우선순위테이블을 작성하고 이에 근거하여 셋업의 순서 및 각 셋업별 특징형상의 가공순서를 결정한다.

	MF1	MF2	MF3
MF1			1(w)
MF2			2(w)
MF3	2(w)	1(w)	

(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Determination of machining sequences for the setup-based models for the part in Fig. 4.

Fig. 10(a)는 Fig. 4에 있는 특징형상의 가공우선순위 테이블이며, (b)와 (c)는 이에 입각한 SFM1과 SFM2의 특징형상 간 우선순위를 도식적으로 나타낸 것이다. 앞 절에서 설명한 가공우선순위 규칙에 따라 특징형상 간 가공우선순위를 테이블로 작성한다. 테이블의 왼쪽 열에 있는 특징형상이 위쪽 행에 있는 특징형상에 대한 가공순위를 나타내며, 1은 행에 있는 특징형상에 대해 먼저 가공하여야 한다는 의미이고, 2는 나중에 가공하여야 한다는 의미이다. 괄호안의 알파벳은 우선순위를 반드시 준수하여야 하는 경우는 s(strong)로 나타내며 이는 2.2 절에서 설명한 가공가능성에 관련된 경우이다. w(weak)는 2.3절에서 설명한 제작효율성과 관련된 우선순위로 다른 우선순위와 상충될 경우에는 준수하지 않아도 된다는 의미이다.

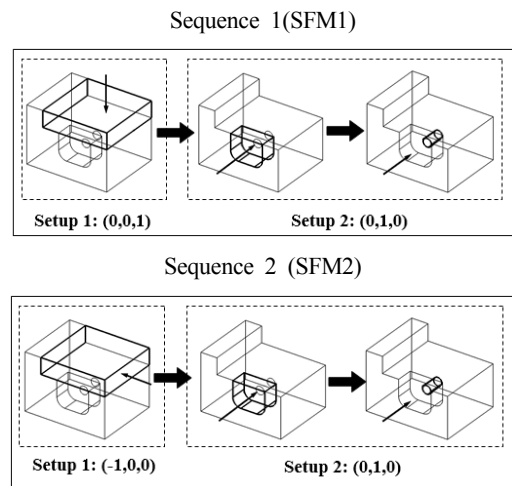


Fig. 11. Machining sequences for the non-overlapping features for the part in Fig. 4.

4. 가공순서에 따라 해당 특징형상을 나머지 특징형상들로 감법작업을 이용하여 서로 겹치지 않는 특징형상들로 변환한다.

하나의 특징형상을 가공하게 되면 이와 겹쳐 있는 다른 특징형상들의 형상은 바뀌게 된다. 따라서 가공순서에 따라 특징형상들 간에 감법 불리언작업을 통해 서로 겹치지 않는 최종 특징형상을 생성한다. Fig. 11은 가공순서가 적용된 겹치지 않는 특징형상을 보여주고 있다.

5. 4단계에서 변환된 겹치지 않는 특징형상들을 이용하여 예상가공시간을 계산한다.

본 연구에서 사용한 예상가공시간 T는 다음과 같은 식으로 계산된다.

$$T = \sum_{i=1}^n (Tc_i) + mT_s$$

위의 식에서 n은 특징형상의 개수, Tc_i는 특징형상 가공에 필요한 시간, m은 셋업의 개수, T_s는 셋업에 필요한 시간이다. Tc_i는 해당 특징형상을 가공할 수 있는 공구의 최대크기를 계산하고[8], 이를 이용하여 공구경로를 생성한 후, 공구의 이송속도 및 가공깊이를 반영하여 계산하였다[9].

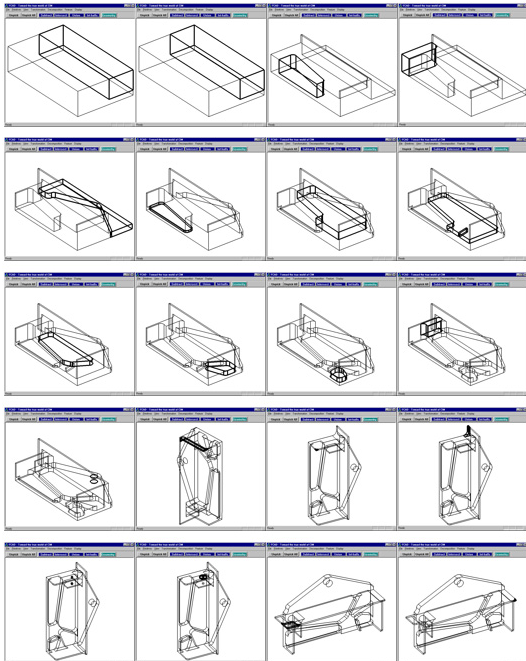


Fig. 12. An example part and its machining sequences.

4. 구현 및 예

앞서 기술한 방법들은 C/C++와 ACIS 형상모델링커널[10]을 이용해 PC에서 구현하였으며, 다양한 절삭가공 기계부품을 사용하여 테스트를 수행하였다.

Fig. 12는 항공기의 좌석에 사용되는 부품의 가공순서를 보여주고 있다. 본 방법은 이 부품으로부터 20개의 특징형상을 인식하고, 5개의 가능한 공구접근방향으로부터 4번의 셋업이 필요한 가공시간이 가장 적은 가공순서를 자동으로 생성하였다. Fig. 13은 본 방법에 의해 자동으로 생성된 해당 부품의 가공순서에 및 이에 따른 가공 파라미터들의 값을 보여주고 있다.

PLAN SHEET										
#	OPERATIONS	TOOL DIA(mm)		FEEDRATE(mm/s)		PASSES		TRAJECTORY(mm)		MACHINING TIME(min)
		R	F	R	F	R	F	R	F	
DIR = (0.000, 0.000, -1.000)										
1	SETUP									
1	MILLING		50.0		2.3		3		198	4.8
2	MILLING	50.0	12.0	2.3	2.3	1	2	415	258	3.2
3	MILLING	40.0	12.0	2.8	2.3	1	3	95	153	0.6
4	MILLING	30.0	18.0	3.8	4.6	2	2	66	81	1.4
5	MILLING	30.0	15.0	3.8	3.1	1	1	276	225	1.7
6	MILLING	15.0	12.0	3.1	2.3	1	1	308	251	1.2
7	MILLING	50.0	12.0	2.3	2.3	1	2	247	253	2.0
8	MILLING	25.0	12.0	4.5	2.3	1	1	628	295	2.9
9	MILLING	30.0	12.0	2.3	2.3	1	1	30	125	0.8
10	MILLING	30.0	12.0	3.8	2.3	1	1	242	295	1.7
11	MILLING		12.0		2.3		2		82	2.2
12	DRILLING		12.7		4.5		1		10	0.2
13	MILLING	15.0	12.0	3.1	2.3	2	2	34	130	0.3
DIR = (0.000, -1.000, 0.000)										
14	SETUP									
14	MILLING	18.0	5.0	4.6	1.0	1	1	30	38	0.3
15	MILLING		5.0		1.0		1		15	2.0
DIR = (-1.000, 0.000, 0.000)										
16	SETUP									
16	MILLING	18.0	5.0	4.6	1.0	1	2	18	21	0.2
DIR = (1.000, 0.000, 0.000)										
17	SETUP									
17	MILLING		18.0		4.6		1		13	0.2
18	MILLING		18.0		4.6		2		22	0.4
19	DRILLING		7.5		4.6		1		8	0.1
20	MILLING		12.0		4.6		1		17	0.3

Fig. 13. The plan and the machining parameters generated by the method for the part in Fig. 12.

5. 결론

본 연구에서는 최대볼륨분해법으로 인식된 절삭가공 특징형상으로부터 제작시간을 최소화할 수 있는 가공순서를 자동으로 생성할 수 있는 방법을 제안하였다. 본 연구에서 제안된 방법 및 향후 연구방향을 정리하면 다음과 같다.

- 특징형상간의 가공순위를 결정하는 데에 있어 가공가능성 및 제작효율성을 반영한 가공우선순위를 고려하였다.
- 가공우선순위를 이용하여 고려하여야 할 가공순서 조합의 수를 획기적으로 감소시켰다.
- 감소한 가공순서의 조합의 각각의 가공시간을 대략적으로 계산하고 이에 기반하여 제작시간을 최

소화하는 가공순서를 자동으로 생성하였다.

- 규칙 및 휴리스틱스에 기반한 본 연구의 특성상 일반화된 가공순서를 제시하기는 어렵다는 한계가 있으며, 향후 연구로 가공순서를 효율성을 비교할 수 있는 레퍼런스 모델을 구축하고 이를 이용하여 좀 더 객관적인 데이터를 확보할 예정이다.

References

- [1] H. Sakurai, P. Dave, "Volume decomposition and feature recognition: Part I-polyhedral objects", Computer Aided Design, Vol. 27, No. 11, pp. 833-843, 1995.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(95\)00007-0](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(95)00007-0)
- [2] H. Sakurai, P. Dave, "Volume decomposition and feature recognition: Part II-curved objects", Computer Aided Design, Vol. 28, pp. 519-537, 1996.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(95\)00067-4](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(95)00067-4)
- [3] Y. Woo, "Fast cell-based decomoposition and applications to solid modeling", Computer Aided Design, Vol. 35, pp. 969-977, 2003.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(02\)00144-6](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(02)00144-6)
- [4] M. R. Henderson, "Extraction of feature information from three dimensional CAD data", PhD Thesis, Purdue University, USA, 1984.
- [5] S. Joshi, T. C. Chang, "Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3D solid model", Computer Aided Design, Vol. 20, No. 2, pp. 58-66, 1988.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485\(88\)90050-4](http://dx.doi.org/10.1016/0010-4485(88)90050-4)
- [6] W. C. Regli, S. K. Gupta, D. S. Nau, "Extracting alternative machining features: An algorithmic approach", Research in engineering design, Vol. 7, No. 3, pp. 173-192, 1995.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/BF01638098>
- [7] I. Han, A. G. Requicha, "Integration of feature-based design and feature recognition", Proceeding of the computers in engineering conference and engineering database symposium ASME, pp. 569-578, 1995.
- [8] M. Bala, T. C. Chang, "Automatic cutter selection and optimal cutter path generation for prismatic parts", International Journal of Production Research, Vol. 29, No. 11, pp. 2163-2176, 1991.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1080/00207549108948076>
- [9] D. Veeramani, Y. Gau, "Selection of an optimal set of cutting-tool size for 2.5D pocket machining", Computer Aided Design, Vol. 29, No. 12, pp. 869-877, 1997.
DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485\(97\)00042-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0010-4485(97)00042-0)
- [10] ACIS 3D modeling kernal, Spatial Corp, USA, <http://www.spatial.com>

우 윤 환(Yoonhwan Woo)

[정회원]



- 2002년 6월 ~ 2004년 8월 : 국민대학교 자동차공학전문대학원 계약교수
- 2004년 9월 ~ 2005년 2월 : 성균관대학교 기계기술연구소 연구교수
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한성대학교 기계시스템공학과 부교수

<관심분야>

기계설계, 형상모델링, CAD/CAM

강 상 욱(Sangwook Kang)

[정회원]



- 1992년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 학사
- 1994년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 석사
- 1995년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 박사
- 2001년 3월 ~ 현재 : 한성대학교 기계시스템공학과 교수

<관심분야>

기계설계, 소음진동