한국 CAD/CAM 학회 논문집
제 3 권 제 3 호 1998년 9월 pp. 192-200

학술논문

자유곡면 가공공정의 정형화된 모델링

김대현*, 김보현**, 편영식***, 최병규****

Structured Modeling of Sculptured Surface Machining Process

Dae H. Kim*, Bo H. Kim**, Young S. Pyoun*** and Byoung K. Choi****

ABSTRACT

Even though most die-maker are using CAD/CAM systems for NC tool-path generation, "front-end" CAD/CAM technologies have not been fully adapted to sculptured surface machining(SSM) nor are sufficiently utilized in die shops. This gap between die-making industry and CAD/CAM community persists mainly because of the lack of a SSM-process model through which the two groups communicate with each other. Proposed in this paper is a model of SSM-processes which is built around the concepts of machining stages, unit machining operations, and each machining stage is decomposed into a sequence of unit machining operations(UMOs). Identified in the paper are five machining stages and 17 types of UMO. Based on the framework of the proposed model, an example of inner-panel stamping-die machining processes is described in detail.

Key words : UMO, Machining stages, SSM-process model

1. 서 론

자유곡면 가공의 주요 응용분야인 금형제작은 특히 자동차나 가전산업에서 중요한 역할을 담당하고 있다. 금형제작에서의 주 관심사항은 금형 납기단축과 가공 정밀도 향상이다. 금형 제작기간은 형상의 크기와 복잡도에 따라 약간씩 다르지만 대략 1,200~3,800 시간이 소요된다[1]. 여기서 전체 금형 제작기간 중에서 NC-code 생성 및 가공시간이 60%, 사상이 20%를 차지한다.

대부분의 금형업체들에서 공구경로 생성을 위해서 CAM 시스템이 사용되고 있지만, 가공 공정계획 수립이나 절삭조건 등과 같은 실제적인 업무는 아직도 현장작업자들에 의해 결정되고 있다[2]. 또한 특징형상 기술(feature technology)이나 자동공정계획(CAPP) 기술 등은 현재 개발중이거나 연구가 진행되고 있지만[3-7], 실제 금형제작 업무에는 거의 활용되지 못하고 있다. 즉, 공정계획 수립이나 공구경로 생성분야에 있어서 금형 제작업체들과 CAD/CAM 개발업체들 사이에는 상당한 간격이 있다.

금형제작에 있어서 공구경로생성이 가장 취약한 부분이고, 효율적인 가공 공정계획의 수립과 절삭조건의 최적화가 고속가공에서 가장 중요하다[8]. 본 연구는 가공 공정계획 수립에 관하여 금형제작업체와 CAD/CAM 개발자들 사이의 간격을 좁히는데 기여할 수 있는 가공공정의 정형화된 모델 개발에 관한 것이다.

국내 금형업체들은 자신들의 금형제작 환경과 전통이 구축되어 있으며, 각기 독특한 가공방법을 가지고 있다. 그렇지만 NC 프로그래머 및 작업자들은 금형제작에 있어서 가공공정을 기술할 수 있는 정형화된 모델이 없기 때문에 의사소통에 많은 어려움을 겪고 있다. 특수한 분야의 가공공정[1,2,10,11,12]에 대해서는 부분적인 연구가 진행되었으나, 가공공정의 체계적인 모델에 대한 연구는 진행되지 않았다.

본 연구에서는 가공단계(MS; machining stages) 및 단위가공공정(UMO; unit machining operation) 등의

*(주) 대우전자 금형공장
**학생회원, 한국과학기술원 산업공학과
***선문대학교 기계공학과
****종신회원, 한국과학기술원 산업공학과

개념에 기반을 둔 금형 가공공정 모델을 자세히 기술한다. 제 2장에서는 자유곡면 가공공정에 관한 용어들을 정의하고, 제 3장에서는 자유곡면 가공공정을 표현하기 위한 순차적인 모델과 계층적인 모델을 제시한다. 제시된 금형 가공공정 모델들은 단위가공공정(UMO)과 가공단계로 표현된다. 제 4장에서는 단위가공공정에 대해서 자세히 기술되는데, 단위가공공정 구분을 위한 필요요소로 공구경로 위상관계, 밀링가공 사양을 제시하고 3축 NC가공에서 자주 사용되는 볼 엔드밀(ball endmill)과 평 엔드밀(flat endmill) 단위가공공정을 정리하였다. 또한 단위가공공정을 정형화된 형태로 표현하는 기술형식을 제시하였다. 제 5장에서는 가공단계에 기술하고 단위가공공정과 가공단계의 관계를 정리하였다. 마지막 장에서는 실제 프레스 가공공정에 적용함으로써 제시된 모델의 유용성을 살펴보았다.

2. 기본개념 및 정의

지금까지 에어포일 가공[10], 임펠러 가공[11], 선박용 프로펠러 가공[2,12], 의료기구 부품의 가공[1] 등의 자유곡면 가공공정(SSM process; sculptured surface machining process)에 대한 많은 연구들이 발표되었다. 그렇지만 자유곡면 가공공정을 표현할 수 있는 일관화된 모델이 없기 때문에 위에서 인급된 각 가공들간의 비교는 사실상 어렵다. 무엇보다도 먼저 일관화된 틀을 갖추기 위해서는 먼저 가공공정과 관련된 용어들이 정립되어야 한다. 자유곡면 가공공정의 정형화된 모델을 위한 첫단계로 본 연구에서는 다음과 같이 기본적인 17가지 용어를 정의하였다.

- 단위가공공정(UMO): 자유곡면 가공의 기본단위로써 하나의 공구로 정의된 가공영역 내부를 특별한 패턴으로 가공하는 것.
- 가공단계(MS): 황삭, 정삭, 잔삭 등과 같은 특정한 가공목적을 달성하는데 필요한 단위가공공정들의 집합.
- 자유곡면 가공공정(SSM-process): 자유곡면을 갖는 제품을 제작하는데 필요한 가공단계들의 집합.

단위가공공정이나 가공단계는 응용분야에 따라 실제적으로 다르게 정의되어 사용되지만, 기본적으로 자유곡면 가공공정을 표현하는 틀을 제공한다. 자유곡면 가공의 목적은 가공소재로부터 일련의 가공공정을 적용하여 원하는 최종형상을 얻는 것이다. 여기서 가공 수행전의 초기소재 상태를 원소재(raw-stock)라 하고, 하나의 단위가공공정의 시작과 끝난

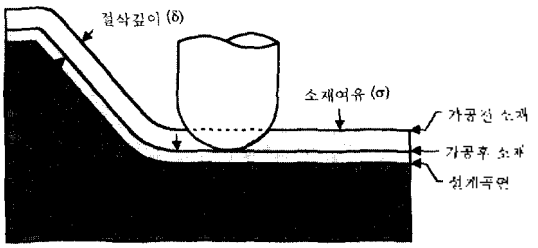


Fig. 1. Surfaces and allowance for a unit machining operation.

후의 소재상태를 각각 가공전 소재(preform)와 가공후 소재(postform)라 한다. 그리고 최종소재(finished-part)는 일련의 가공공정 수행 후에 얻어진 최종적인 상태를 나타낸다.

형상곡면(part-surface)은 자유곡면 가공공정을 적용하여 얻고자 하는 이상적인 곡면을 나타낸다. 소재곡면은 소재상태에 따라 원소재 곡면(raw-stock surface), 가공전 소재곡면(preform-surface), 가공후 소재곡면(postform-surface), 최종 소재곡면(finished-part surface) 등으로 구분된다. 또한 설계자에 의해 정의된 제품의 곡면모델을 설계곡면(design surface)이라 한다.

Fig. 1에 나타나 있듯이 위에서 인급된 곡면들간에는 특정한 관계가 존재한다. 즉, 가공전 소재곡면과 설계곡면의 차이는 소재여유(stock allowance; σ)이고, 가공후 소재곡면과 설계곡면의 차이는 미가공여유(uncut allowance; υ)가 된다. 또한 절삭깊이(cutting depth; δ)는 가공후 소재곡면과 가공전 소재곡면의 차이이며, 가공오차(machining tolerance; τ)는 이상적인 가공후 소재곡면과 실제 가공된 소재곡면 사이에 허용되는 편차를 의미한다.

전체 공정계획상에서 가공오차는 매우 중요한 역할을 한다. 황삭 및 중삭단계에서 가공오차는 비교적 큰 값으로 설정되어지는데, 이것은 CAM 작업시간, 컴퓨터 계산시간 및 가공시간을 감소시키는 효과를 가져온다. 정삭단계에서 가공오차는 가공곡면의 품질을 보장하기 위하여 보다 작은 값으로 설정하는데, 이에 따라 정삭단계에서 제일 많은 가공시간이 요구된다. 위에서 기술했듯이 자유곡면 가공공정에서 가공오차는 가공곡면의 품질, 가공시간 등을 고려하여 신중하게 설정되어야 한다.

3. 가공공정 모델

모델링 과정은 추상화(abstraction)와 일반화(gener-

alization)를 포함하고 있는데, 결과적으로 생성된 모델은 문제를 해결하거나 탐색하는 유용한 도구일 뿐 아니라 일반적인 틀로 활용된다. 여기서는 제안된 자유곡면 가공공정 모델의 두 가지 형태, 즉, 순차적인 모델(sequential model)과 구조적인 모델(hierarchical model)을 자세히 기술한다.

3.1 순차적인 모델

추상화된 관점에서 보면, 자유곡면 가공공정은 일련의 소재제거 함수(MRF; material removal function)들이다. 여기서 MRF_j를 다음과 같은 가공전 소재를 가공후 소재로 변환시키는 가공단계 j의 함수라고 하면,

$$postform_j \Leftarrow \mathrm{MRF}_j(preform_j) \quad (1)$$

자유곡면 가공공정의 추상화된 순차적인 모델은 다음과 같이 표현된다.

Abstract-squential_SSM-process = {MRF_1, MRF_2, ..., MRF_n} (2)

Begin
  $S_1 \Leftarrow$ *raw-stock*;
  For *j*=1 to *n*-1 {$P_j \Leftarrow \mathrm{MRF}_j(S_j)$; $S_{j+1} \Leftarrow P_j$};
  finished-part $\Leftarrow \mathrm{MRF}_n(S_n)$
End,

여기서 S_j, P_j: MRF_j에서 가공전 및 가공후 소재를 나타낸다.

만약 개개의 단위가공공정들이 변환함수들(즉, $MRF_j \equiv UMO_j$ for j=1, 2, ..., n)로 사용된다면, 하나의 단위가공공정 모델을 얻을 수 있다. 마찬가지로 가공단계들이 사용되어지면, 하나의 가공단계 모델을 얻을 수 있다. 예를들어 황삭, 중삭, 정삭과 같이 세 개의 가공단계가 사용된다면, 다음과 같은 가공단계 모델이 얻어진다.

Machining-stage_SSM-process = {ROUGH, S-FINISH, FINISH} (3)

Begin
  semi-finish-preform $\Leftarrow$ ROUGH(*raw-stock*);
  finish-preform $\Leftarrow$ S-FINISH(*semi-finish-preform*);
  finished-part $\Leftarrow$ FINISH(*finish-preform*);
End,

3.2 계층적인 모델

Fig. 2에 나타나 있듯이, 각 가공단계는 일련의 단위가공공정으로 구성된다는 사실로부터 자유곡면

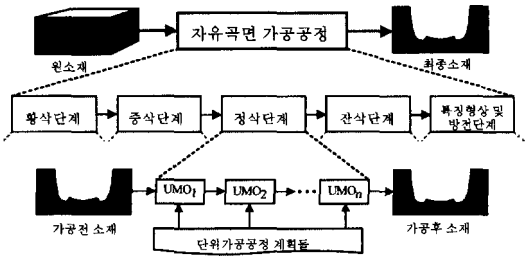


Fig. 2. Surfaces and allowance for a unit machining operation.

가공공정의 "계층적인 모델"은 얻을 수 있다. 계층적인 모델에서 자유곡면 가공공정은 가공단계 모델처럼 여러개의 가공단계들로 구성되며, 각 가공단계는 여러개의 단위가공공정으로 구성된다.

계층적인 관점에서 자유곡면 가공공정은 일련의 가공단계로 모델링되고, 각 가공단계는 일련의 단위가공공정으로 분할된다. 이러한 계층적인 모델은 다음과 같이 표현할 수 있다.

Hierarchical_SSM-process = {M_1-*stage*, ..., M_5-*stage*} (4)
M_i-*stage* = {$UMO_{i,1}$, $UMO_{i,2}$, ..., $UMO_{i,mj}$}
Begin
  preform $\Leftarrow$ raw-stock;
  For j=1 to 5 do {
    $S_1 \Leftarrow preform_j$;
    For *k*=1 to *m*-1 do {$S_{k+1} \Leftarrow UMO_{j,k}(S_k)$;
    $postformj \Leftarrow UMO_{j,mj}(S_{mj})$;
    $preform_{j+1} \Leftarrow postform_j$;
  }
  finished-part $\Leftarrow preform_6$;
End,

여기서 M_1-*stage*: 황삭단계; M_2-*stage*: 중삭단계; M_3-*stage*: 정삭단계; M_4-*stage*: 잔삭단계; M_5-*stage*: 특징형상 & 방전 단계를 나타낸다.

4. 단위가공공정(Unit Machining Operation)

이 장에서는 단위가공공정 기술형식에 따라 3축가공의 단위가공공정들을 기술한다. Fig. 3에 나타나

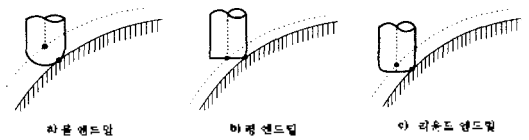


Fig. 3. 3-axis milling operations for sculptured surface machining.

있듯이, 3축 자유곡면 가공공정에 일반적으로 사용되는 공구는 볼 엔드밀(ball-endmill), 평 엔드밀(flat-endmill), 라운드 엔드밀(round-endmill) 등이다.

4.1 공구경로 위상관계와 밀링가공 사양

자유곡면 가공은 밀링공구가 일련의 공구접촉점들을 지나는 가공공정이다. 이러한 방식으로 특정한 영역을 가공할 때 이것을 영역가공이라고 부르고, 이때 스캐닝이나 공구가 지나가는 패턴을 공구경로 위상관계라 한다[13]. 여기에는 4가지 형태의 공구경로 위상관계 패턴이 존재하며, 다음과 같이 요약할 수 있다(BC(boundary contour): 경계곡선; CPO(contour parallel offset): 등고선 평행 오프셋).

- 순차적 패턴(serial pattern): xy-평행, BC-평행, BC-수직(Fig. 4)
- 방사상 패턴(radial pattern): 나선형(spiral) 및 CPO (Fig. 5)
- 스트립 패턴(strip pattern): 스트립 평행, 스트립 수직(Fig. 6)
- 등고선 패턴(contour pattern): 나사선 모양(helical), 일정한 z값 및 BC-평행(Fig. 7)

순차적 패턴과 방사상 패턴은 영역가공에 사용되고, 등고선 패턴은 수직벽이나 경사진 부분의 가공에 사용된다. 특히, 방사상 패턴의 나선형과 등고선 패턴의 나사선 모양 공구경로는 고속가공에 널리 사

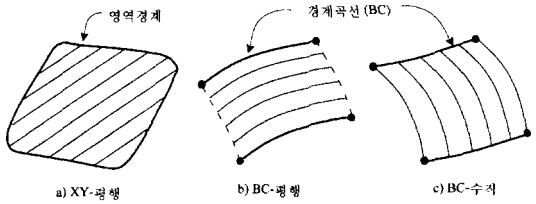


Fig. 4. Serial-pattern topology.

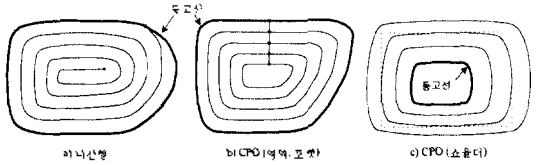


Fig. 5. Radial-pattern topology.

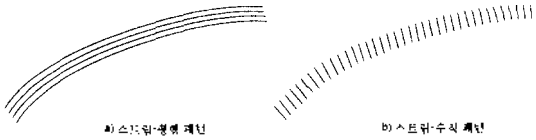


Fig. 6. Strip-pattern topology.

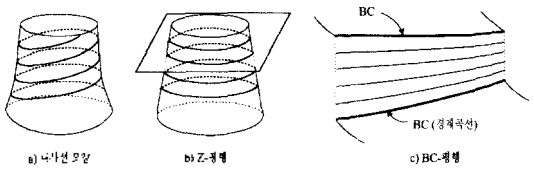


Fig. 7. Contour-pattern topology.

용되어지고 있다. 여기서 BC-평행 위상관계는 등매개변수 공구경로(isoparametric tool-path)를 포함하는 넓은 개념으로 사용된다.

또한 영역가공 계획을 수립할 때 다음과 같은 밀링가공 사양14 및 가공공정과 관련된 변수들을 고려해야 한다.

- 밀링 방식(milling mode): 상향절삭(up-cutting)이나 하향절삭(down-cutting)
- 수직 이동(vertical move): 상방향 밀링(upward milling)이나 하방향 밀링(downward milling)
- 유효 절삭부위(effective cutting edge): 경사각의 범위 등

공구경로 연결(tool-path linking): 지그재그(zig-zag), 한방향(one-way) 등

4.2 볼 엔드밀 단위가공공정

볼 엔드밀은 지금까지 자유곡면 가공공정에서 가장 널리 사용되었다. Fig. 8에 나타나 있듯이, 자유곡면 가공공정에는 7가지 형태의 볼 엔드밀 단위가공공정이 이용된다. 볼 엔드밀 단위가공공정과 여기에 사용되는 공구경로 위상관계들은 다음과 같이 정리할 수 있다.

① 영역가공(area-cut): 순차적 패턴과 방사상 위상관계(Fig. 8-a)

② 필렛가공(fillet-cut): 스트립 위상관계(Fig. 8-b)

③ 펜슬가공(Fig. 8-c)

④ 등고선가공(contour-cut): 등고선 패턴 위상관계(Fig. 8-d)

⑤ 포켓팅(pocketing): 방사성 패턴 위상관계(Fig. 8-e)

⑥ 쇼울더링(shouldering): 방사성 패턴 위상관계나 xy-평행(Fig. 8-f)

⑦ 계단식가공(plane-stepping): xy-평행(Fig. 8-g)

영역가공 단위가공공정은 곡면상의 정의된 영역 내부를 이동하면서 부드러운 곡면을 생성하는데 주로 사용된다. 만약 정삭가공시 반경이 큰 볼 엔드밀이 사용된다면, 곡면상의 각진 오목필렛을 따라서 스트립형태의 미가공 영역이 나타나게 된다. 이러한

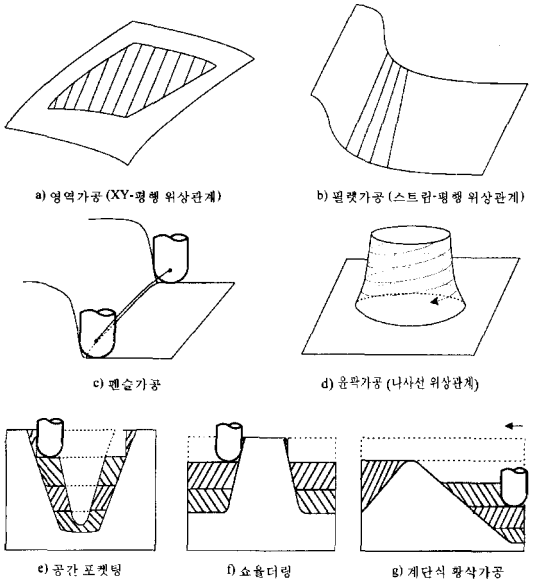


Fig. 8. Ball-end mill UMOs.

필렛영역의 미가공 부위는 반경이 작은 볼 엔드밀에 의해서 잔삭가공으로 처리된다. 잔삭에서 사용하는 볼 엔드밀의 반경보다 필렛의 반경이 작은 경우에 볼 엔드밀은 두점 이상에서 곡면과 접촉하게 된다. 이때 볼 엔드밀 중심점들의 궤적을 "펜슬곡선"이라 하며, 펜슬곡선을 따라 가공하는 것을 펜슬가공 단위가공공정이라 한다.

Fig. 8-d에 나타나 있듯이, 가운데가 불룩하게 튀어나온 곡면은 등고선가공 단위가공공정을 적용함으로써 효과적으로 가공할 수 있다. Fig. 8의 나머지 단위가공공정은 황삭형태의 단위가공공정(포켓팅, 쇼울더링, 계단식 가공)이다. 이러한 단위가공공정들은 기본적으로 일련의 수평 절단평면(cutting plane)에서 정의된 가공영역을 제거하는 개념이다. 이때 수평 절단평면의 두께를 "평면간격(plane-step)"이라 하고, 이러한 형태의 황삭을 절단평면 방법이라 한다.

Fig. 8-e에 나타나 있듯이, 포켓팅에서 제거되어야 할 소재의 내부가 이미 캐비티 형태의 빈공간인 경우에 이를 공간 포켓팅(hollow pocketing)이라 한다. 반면에 캐비티와 같이 빈공간이 없이 속이 꽉찬 소재를 가공하는 것을 일반적인 포켓팅이라 한다.

4.3 평 엔드밀 단위가공공정

자유곡면 가공공정에서 흔히 사용되는 평 엔드밀 단위가공공정은 7가지이며, 이러한 단위가공공정들과 여기에 사용되는 공구경로 위상관계를 정리하면

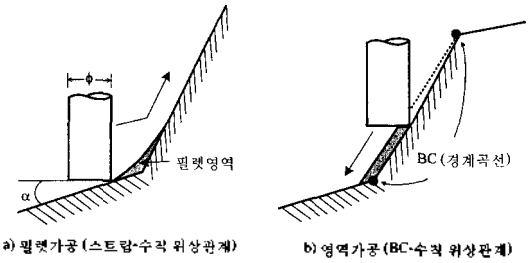


Fig. 9. Flat-end mill (& round-end mill) UMOs.

다음과 같다.

① 필렛가공(상향절삭에만 적용): 스트립 위상관계(Fig. 9-a)

② 영역가공(하향절삭에만 적용): BC-수직 위상관계(Fig. 9-b)

③ 슬로팅(slotting)

④ 2차원 윤곽가공(2D-contouring)

⑤ 포켓팅: 방사상 패턴 위상관계

⑥ 쇼울더링: 방사상 패턴 위상관계나 xy-평행

⑦ 계단식가공(상향절삭에만 적용): xy-평행

3축 NC 기계의 정삭가공시 평엔드밀은 Fig. 9에 나타나있는 2가지 경우를 제외하고는 거의 사용되지 않는다. 즉, Fig. 9-a의 스트립 수직 필렛가공 단위가공공정(상향절삭)은 사출금형 정삭가공에 사용되고, Fig. 9-b의 BC-수직 영역가공 단위가공공정(하향절삭)은 잔삭가공에 사용된다. 슬로팅 및 2차원 윤곽가공과 같은 단순한 단위가공공정은 황삭이나 특징형상부위 가공단계에서 사용되며, 포켓팅, 쇼울더링, 계단식가공 등은 볼 엔드밀에서와 비슷하게 정의된다.

4.4 단위가공공정의 기술형식

단위가공공정 명세는 네개의 속성 - 이름, 밀링전략 사양, 공구경로 위상관계, 공구명세 등으로 구성된다. 단위가공공정의 각 속성들은 다음과 같이 표현된다(BC: 경계곡선; CPO: 등고선 평행 오프셋).

단위가공공정 *이름* =

(영역가공, 필렛가공, 등고선가공, 포켓팅, 쇼울더링, 계단식가공, 슬로팅, 2차원 윤곽가공) (6)

경로 위상관계 =

(xy-평행, BC-평행, BC-수직, 방사상, CPO, 스트립 평행, 스트립 수직, 나사선 모양, z값 고정) (7)

밀링 전략 =

((상, 하)×(상향, 하향)×(지그재그, 한방향)) (8)

공구 명세 = (공구형태×공구치수) (9)

널리 사용되는 공구로는 볼 엔드밀(BEM; ball endmill), 평 엔드밀(FEM; flat endmill), 라운드 엔드밀(REM; round endmill), 테이퍼 엔드밀(TEM; taper endmill), 테이퍼 라운드 엔드밀(TREM; taper round endmill), 사이드밀(SM; side mill), 페이스밀(FM; face mill) 등이다. 여기서 공구의 주요 치수는 직경(φ), 코너 반경(χ), 길이(λ), 테이퍼 각도(τ)이다. 공구명세의 예는 다음과 같다.

- BEM30φ: 직경이 30 mm인 볼 엔드밀
- FEM30φ50λ: 직경이 30 mm, 길이가 50 mm인 평 엔드밀
- REM30φ5χ: 직경이 30 mm, 코너 반경이 5 mm인 라운드 엔드밀
- TREM30φ5χ2τ: 직경이 30 mm, 코너 반경이 5 mm, 테이퍼 각도가 2도인 테이퍼 라운드 엔드밀

단위가공공정 기술형식에서 단위가공공정 이름은 주요어이고 위상관계는 수식어이다. 그리고 밀링전략과 공구명세는 인자로 취급된다. 즉,

단위가공공정 ::= 경로-위상관계 단위가공공정-이름[밀링-전략, 공구명세, 등], (10)

여기서 각 속성은 식 (6)~식 (9)에 나타나 있다.

하나의 단위가공공정은 속성들의 값에 의해서 유일하게 결정된다. 단위가공공정 기술에 대한 몇가지 예는 다음과 같다.

- 포켓팅: 하나의 포켓팅 단위가공공정
- CPO 공간-포켓팅[BEM50φ]: 직경이 50 mm인 볼 엔드밀로 CPO형태 공구경로 위상관계에 의해서 수행한 공간-포켓팅 단위가공공정(Fig. 8-c 참조)
- 스트립-수직 필렛가공[상향, FEM8φ]: Fig. 9-a에 나타난 단위가공공정

5. 가공단계(Machining Stage)

일반적으로 단위가공공정들은 그들의 목적에 따라 가공단계로 분류된다. 예를 들어, 단위가공공정의 목적이 원소재로부터 가능한 빨리 소재를 제거하는 것이라면 이것은 황삭 단위가공공정으로 분류된다.

5.1 2단계 구조

2단계 구조에서는 모든 단위가공공정들은 황삭단계와 정삭단계로 분류된다. 황삭단계의 주요 고려사항은 1) 높은 소재제거율(MRR)과 거친 표면조도, 2) 공구 접촉부위의 심한 변동, 3) 공구떨림 및 내부 힘과 같은 제약조건 등이다[8]. 반면에 정삭단계의 주요 고려사항은 1) 작은 이송속도에 의한 많은 가공시간, 2) 공구마모 및 힘 등과 같은 제약조건 등이다.

5.2 5단계 구조

대부분의 경우에 중삭단계가 2단계 구조에 추가된다. 중삭단계의 목적은 정삭단계를 위한 일정한 소재여유를 갖는 소재를 만드는 것이다. 이때 중삭단계의 미가공 여유(υ)는 정삭단계의 소재여유(σ)에 해당한다. 사출금형 가공에서 중삭단계의 미가공 여유 표준으로 흔히 0.3 mm(υ=0.3)가 사용된다.

프레스금형 고속가공과 같은 대부분의 금형가공에서 정삭가공시 반경이 큰 볼 엔드밀이 사용되기 때문에 오목한 부분의 미가공 부위를 제외하고 대부분 빨리 가공이 수행된다. 이러한 미가공 부위는 보다 작은 반경을 갖는 공구를 이용하여 제거하는데 이러한 가공단계를 잔삭단계라 한다.

더욱이 사출금형 가공시 볼 엔드밀로 가공할 수 없는 각진 오목한 곡선이나 단차진 곳은 특별히 제작한 형상공구(form-cutter)나 방전으로 가공한다. 이 단계를 형상 및 방전 가공단계라 하는데, 이때 방전에 사용되는 전극은 흔히 볼 엔드밀로 가공한다. 위에서 언급된 내용을 요약하면, 5단계 구조는 황삭단계, 중삭단계, 정삭단계, 잔삭단계, 형상 및 방전단계이다.

5.3 가공단계와 단위가공공정

여기서는 앞에서 언급된 5개 가공단계와 단위가공공정들 사이에 특별한 관계가 존재하는지를 살펴보고자 한다. 5개 가공단계의 주요목적은 다음과 같이 요약할 수 있다.

① 황삭단계: 원소재로부터 가능한 빨리 소재를 제거하는 것.

② 중삭단계: 일정한 소재여유를 갖는 정삭 가공전 소재를 생성하는 것.

③ 정삭단계: 최종제품의 마지막 형상(일부 미가공 부분 포함)을 생성하는 것.

④ 잔삭단계: 보다 작은 공구로 미가공 부위를 제거하는 것.

⑤ 형상 및 방전단계: 각진 오목한 부분이나 특별한 단차부분을 생성하는 것.

가공단계와 단위가공공정 사이의 관계는 항상 명확하게 정의되는 것은 아니며, 다음에 나타난 예에 이러한 사항이 잘 나타나 있다.

- 황삭 단위가공공정: 포켓팅[FEM], 소울더링[FEM], 계단식가공[REM], 영역가공[BEM], 등고선가공[BEM], 영역가공[FEM] 등.

중삭 단위가공공정: 영역가공[BEM], 팬슬가공[BEM], 영역가공[FEM], 등.
- 정삭 단위가공공정: 영역가공[BEM], 등고선가공[BEM], 영역가공[FEM], 등.
- 잔삭 단위가공공정: 필렛가공[BEM], 팬슬가공[BEM], 필렛가공[FEM], 등.

형상 및 방전 단위가공공정: 슬로팅[FEM], 2차원 윤곽가공[FEM], 등.

6. 적용 사례

제시된 단위가공공정 기술형식을 사용하여 자동차 프레스금형의 가공공정을 표현하는 예제를 소개한다. 제안된 자유곡면 가공공정 기술형식은 실제 경우를 단순화한 형태이지만, 가공시 고려할 주요요소들을 모두 포함하고 있다. 또한 적용사례에서 기술한 가공 공정계획들이 최상의 것은 아니다는 것을 미리 밝혀둔다.

원소재는 비교적 가공성이 좋은 경도 12-15R_c 정도의 주물이며, 이때 소재여유는 보통 10 mm 정도이다. Fig. 10-a, b는 작은 크기의 내판 프레스금형의 다이측면에 대한 원소재와 최종 금형곡면이 나타나 있다. 다이의 가로, 세로, 높이 치수는 890 mm × 870 mm × 150 mm이다. 5개 가공단계에서 형상 및 방전 단계가 필요없기 때문에 네 개의 가공단계가 적용되며, 공구는 볼 엔드밀이 사용된다.

실제 프레스금형 가공에 적용되는 단위가공공정은 네 개의 가공단계로 분류되고, 각 가공단계에서, 소재여유(σ), 미가공 여유(δ), 가공오차(τ), 볼 엔드밀 직경(φ)은 다음과 같다.

- 황삭단계: σ_r=1.0; ν_r=1.0; τ_r=0.5; Φ_r=50;
- 중삭단계: σ_s=1.0; ν_s=0.3; τ_s=0.15; Φ_s=30;
- 정삭단계: σ_f=0.3; ν_f=0; τ_f=0.05; Φ_f=30, 20;
- 잔삭단계: ν_c=0; τ_c=0.05; Φ_c=25, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 4;

6.1 황삭단계 단위가공공정(Fig. 11)

① BC-평행 등고선가공[BEM50φ, υ=5]: 주 황삭가공시 가공부하를 줄이기 위해 5 mm의 미가공 여유를 남기고 캐비티의 수직벽 부위을 가공한다(Fig. 11-b참조).

② 팬슬가공[BEM50φ]: 주 황삭가공시 가공부하를 줄이기 위해 수직벽과 바닥면 사이의 오목한 필렛영역을 가공한다(Fig. 11-c 참조).

③ xy-평행 영역가공[지그재그, BEM50φ, υ=1]: 주 황삭가공으로 1 mm 미가공 여유를 남기고 전체 곡면을 가공한다(Fig. 11-d참조).

6.2 중삭단계 단위가공공정(Fig. 12)

① 팬슬가공[BEM30φ]: 중삭 영역가공시 가공부하를 줄이기 위해서 오목한 필렛영역을 가공한다

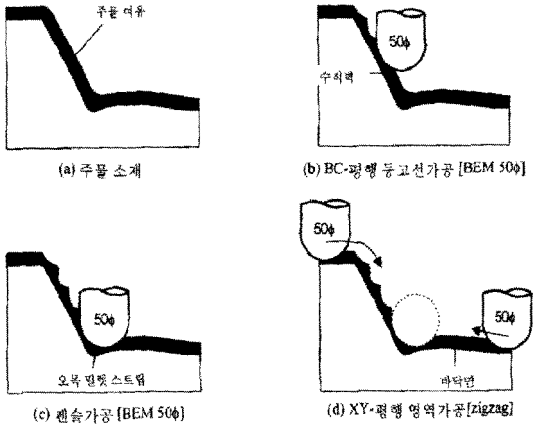
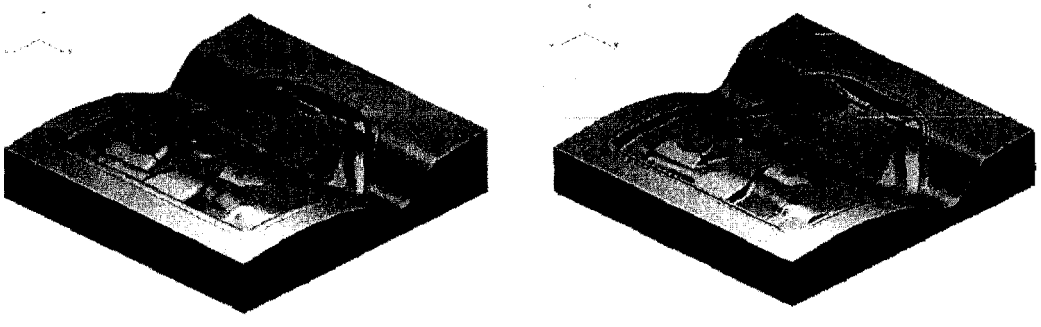
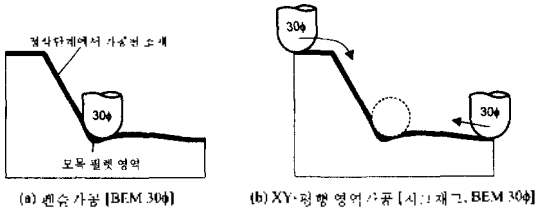


Fig. 11. Unit machining operations at roughing stage (stamping-die).



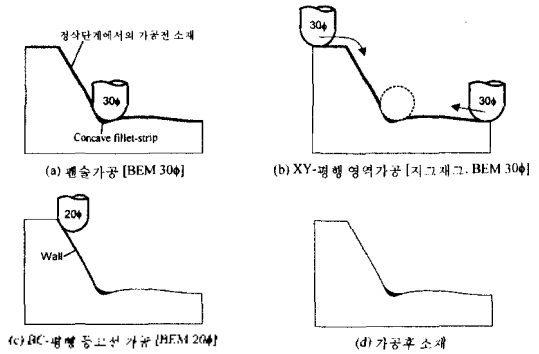
(a) 주물 소재 (b) 최종 금형곡면

Fig. 10. Row stock and final die-surface of a stamping die.



(a) 펜슬 가공 [BEM 30φ] (b) XY-평행 영역가공 [지그재그, BEM 30φ]

Fig. 12. Unit machining operations at semi-finish stage (stamping-die).



(a) 펜슬가공 [BEM 30φ] (b) XY-평행 영역가공 [지그재그, BEM 30φ]

(c) BC-평행 등고선 가공 [BEM 20φ] (d) 가공후 소재

Fig. 13. Unit machining operations at finish stage (stamping-die).

(Fig. 12-a참조).

② xy-평행 영역가공[지그재그, BEM30φ, υ=0.3]: 0.3 mm 미가공 여유를 남기고, 지그재그 방식으로 전체 곡면을 가공한다(Fig. 12-b참조).

6.3 정삭단계 단위가공공정(Fig. 13)

① 펜슬가공[BEM30φ]: 정삭 영역가공시 가공부하를 줄이기 위해 오목한 필렛영역을 가공한다(Fig. 13-a참조).

② xy-평행 영역가공[지그재그, BEM30φ]: 전체곡면을 정삭가공한다(Fig. 13-b참조).

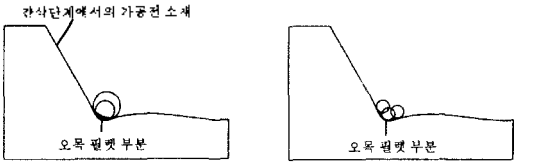
③ BC-평행 등고선가공[지그재그, BEM20φ]: 캐비티의 수직벽들을 선택적으로 가공한다.

6.4 잔삭단계 단위가공공정(Fig. 14)

① 펜슬가공[BEM(φ=25, 20, 16, 12, 10, 8, 6, 4)]: 미가공 부위를 제거하기 위해서 오목한 필렛영역을 따라 일련의 펜슬가공을 수행한다(Fig. 14-a참조).

② 스트립-평행 필렛가공[BEM6φ]: 이전의 펜슬가공시 생성된 커습(cusp)을 제거하기 위해서 오목한 필렛영역을 따라 가공한다(Fig. 14-b참조).

③ 스트립-평행 필렛가공[BEM8φ]: 그림에는 나타나지 않았지만, 오목한 바닥을 가공한다.



(a) 펜슬가공 [BEM-φ] (b) 스트립-평행 필렛가공 [BEM-φ]

Fig. 14. Unit machining operations at clean-up stage (stamping-die).

④ 펜슬가공[BEM12φ]: 오목한 필렛영역을 따라 "릴리이프(relief)" 처리를 위해 펜슬가공을 수행한다.

7. 결론 및 토론

본 연구의 목적은 CAD/CAM 개발자나 금형업체의 실무자들이 이용할 수 있는 자유곡면 가공공정의 정형화된 모델을 제시하는 것이다. 이러한 목적을 위하여 자유곡면 가공공정 모델은 가공단계, 단위가공공정 등의 개념을 바탕으로 구축되었다. 본 연구에서 기술된 내용들을 정리하면 다음과 같다.

자유곡면 가공에 사용되는 17가지의 기본적인 용어들을 정의하였다.

- 자유곡면 가공공정을 표현하는 두가지 모델, 즉, 순차적인 모델과 계층적인 모델을 제시하였다.
- 3축가공이 가능한 단위가공공정들을 정리하고 공구를 기준으로 분류하였으며, 이러한 단위가공공정을 표현할 수 있는 기술형식을 제시하였다.
- 5개의 가공단계(황삭단계, 중삭단계, 정삭단계, 잔삭단계, 형상 및 방전단계) 구조를 제안하고, 가공단계와 단위가공공정 사이의 관계를 살펴보았다.
- 자유곡면 가공공정 모델을 금형가공의 실례에 적용함으로써 제시된 모델의 유용성을 설명하였다.
- 본 연구에서 다루었던 주제들은 다음과 같은 방식으로 자유곡면 가공기술 발전에 기여할 것으로 기대된다.
- 제시된 자유곡면 가공공정 모델과 기본적인 정의들은 자유곡면 가공기술의 발전에 가장 중요한 현장 작업자들 사이의 의사소통 뿐만 아니라 현장과 개발부서간의 의사소통을 활발하게 촉진시킬 것이다.
- 제시된 단위가공공정 모델은 가공공정의 표준화에 기여하고 나아가서 GNC(Generative NC) 개념이 CAM 시스템에 실현될 수 있도록 지원할 것이다.
- 단위가공공정 및 가공단계와 더불어 자유곡면 가공공정 모델은 CAPP 시스템을 개발하는 데 있어서 하나의 틀로써 활용될 수 있을 것이다.

참고문헌

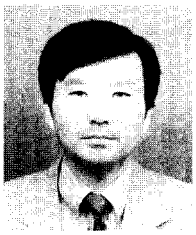
1. Altan, T *et al*, "Advanced techniques for die and mold manufacturing", *Annals of the CIRP*, Vol. 42, No. 2, pp. 707-716, 1993.
2. Falbomer, P., Akgerman, N. and Altan T., "Survey of the US Die and Mold Manufacturing Industry", ERC/NSM-D-95-41(1995), ERC for Net Shape manufacturing, The Ohio State University, USA.
3. Subrahmanyam, S. and Wozny, M., "An overview of automatic feature recognition techniques for computer-aided process planning", *Computers in Industry*, Vol. 26, pp. 1-21, 1995.
4. Kanumury, M. and Chang, T.C., "Process planning in an automated manufacturing environment", *J. of Manufacturing Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 67-78, 1991.
5. Alting, L. and Zhang, H., "Computer aided process planning: the-state-of-art survey", *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 27, No. 4, pp. 553-585, 1989.
6. Soenen, R(eds), "Feature Modeling and Recognition in Advanced CAD/CAM Systems", *Proc. of the IFIP international conference*, May 1994, Valenciennes, France (pver 40 papers on features technology are included in the proceedings).
7. Pratt, M(eds), "Proceeding of IFIP WG5.2 Workshop on Geometric Modeling for CAD", May 1996, Airlie Center, USA (over 15 papers on features technology were presented in the workshop).
8. Fallbohmer, P., Tonshoff, H.K. and Altan, T., "High-speed Milling of Dies and Molds: State-of-the-art Report", ERC/NSM-D-95-17(1995), ERC for Net Shape manufacturing, The Ohio State University, U. S.A.
9. Choi, B.K. *et al.*, "Unified CAM-system architecture for die and mould manufacturing", *Computer Aided Disign*, Vol. 26, No. 3, pp. 235-243, 1994.
10. Mason, F, "5×5 for high-productivity airfoil milling", *American Machinist*, pp, 37-39, Nov 1991.
11. Takeuchi, Y. *et al.*, "5-axis control machining based on solid model", *J. Precision Eng.*, Vol. 56, No. 11, pp. 111-116, 1990. (in Japanese)
12. Choi, B.K., Park, J.W. and Jun, C.S., "Cutter-location data optimization in 5-axis surface machining", *Computer Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 377-386, 1993.
13. Marshall, S. and Griffiths, J.G., "A new cutter-path topology for milling machines", *Computer Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp. 204-214, 1994.
14. Schulz, H. and Hock, S., "High-speed milling of dies and moulds cutting conditions and technology", *Annals of CIRP*, Vol. 44, No. 1, pp. 35-38, 1995.

김 대 현

1983년 울산대학교 산업공학과 학사
1985년 한국과학기술원 산업공학과 석사
1997년 한국과학기술원 산업공학과 박사
1985년~현재 대우전자 구미 금형공장 부장
관심분야 : CAD/CAM, CAPP, NC machining, Jop shop 진도부하관리

김 보 현

1991년 전남대학교 산업공학과 학사
1993년 한국과학기술원 산업공학과 석사
1998년 한국과학기술원 산업공학과 박사
1998년~현재 한국과학기술원 CIM 연구센터 연구원
관심분야 : CAD/CAM, CAPP, NC machining, Surface Modeling



편 영 식

1976년 항공대학교 항공기계공학과 학사
1978년 연세대학교 기계공학과 석사
1994년 한국과학기술원 산업공학과 박사
1994년~현재 선문대학교 기계공학과 교수
관심분야 : 생산시스템 공학, 공작기계 설계

최 병 규

1973년 서울대학교 산업공학과 학사
1975년 한국과학기술원 산업공학과 석사
1982년 미국 purdue대 산업공학과 박사
1982년~현재 한국과학기술원 산업공학과 교수 및 한국과학기술원 CIM 연구센터장
관심분야 : Surface Modeling, CAD/CAM, CAPP, 자동화 제조시스템 모델링 및 시뮬레이션