

자동차 프레스 금형의 스티로폼-패턴 가공을 위한 전용 CAM 시스템 개발

박 정 환*

Development of a Dedicated CAM System for Styrofoam-pattern Machining

Jung W. Park*

ABSTRACT

A dedicated CAM(Computer-Aided Manufacturing) system has been developed, which generates tool-path to machine Styrofoam stamping die-patterns in Chrysler Corporation. A previous process to build die-patterns was to "stick build" the pattern, in which stock is cut & glued together, and then the NC machining of part-surface shape completes building a Styrofoam die-pattern. The current process utilizes the developed CAM system, and almost removes the manual work, consequently reduces the overall lead time. The paper presents the overall system structures, tool-path generation, and some features of Styrofoam pattern machining.

Key words : Styrofoam-pattern, Z-map, NC machining

1. 서 론

일반적으로 자동차 프레스 금형의 소재는 가공여유(casting allowance)를 덧붙인 주물(casting)이며, 많은 경우 주물을 제작하기 위한 모형(pattern)을 스티로폼(styrofoam)으로 제작하고 있다. 또한 프레스 금형은 실제 박판성형이 이루어지는 형상부(part-surface)와 구조부로 구분할 수 있으며, 형상부는 대개 자유곡면 형태를 띠고 있다.

기존의 많은 스티로폼 패턴 제작은 형상부와 구조부로 구분하여, 각각 NC 가공 및 수작업으로 제작하여 왔다(Fig. 1a). 수작업의 경우 2차원 도면을 바탕으로 코어(core), 필렛(fillet) 등의 구조물 형상을 재단하여 접착재로 붙여나가는 과정을 되풀이함으로써 제작기간의 상당 기간을 소모한다. 또한 형상부 가공용 NC 데이터 생성시 범용 CAD/CAM 시스템의 NC 기능을 이용함으로써, 프로그래머의 숙련도에 따른 데이터 생성시간 및 품질의 차이가 크다는 문제점을 가지고 있다. 기존의 패턴 제작 과정의 문

제점은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- 구조부 패턴의 수작업으로 인한 과도한 공수
- 형상부 가공데이터 생성시간 및 품질의 불균일.

본 연구는 Chrysler 자동차(미국 미시간주 디트로이트 소재 MET&D 공장)의 스티로폼 패턴 제작에 있어서 상기 문제점을 해소하기 위한 목적으로 개발한 전용 CAM 시스템 'Pattern-Master'에 관해 다루고 있다. 본 시스템의 목적은

- 수작업 배제 및 완전 NC화(Fig.1-b)
- NC 코드 생성시간 단축
- 품질의 가공데이터 생성

으로 정리할 수 있으며, 결과적으로는 패턴 제작의 생산성 향상을 목표로 한다.

본 연구에서 패턴 가공용 NC 데이터 생성과정은 크게 1) 패턴형상 모델링, 2) 형상데이터 인터페이스, 3) 가공데이터 생성 및 검증의 3단계로 구분할 수 있다. 형상 모델링 작업에는 상용 시스템인 VAMOS® 및 CATIA®를 활용하였으며, 이후 두 단계는 CATIA 인터페이스 및 Pattern-Master에서 수행된다.

CATIA 인터페이스를 위한 기능들은 CATIA의 GII 및 CATGEO 라이브러리를 이용하여 직접 CA-

*영남대학교 기계공학부

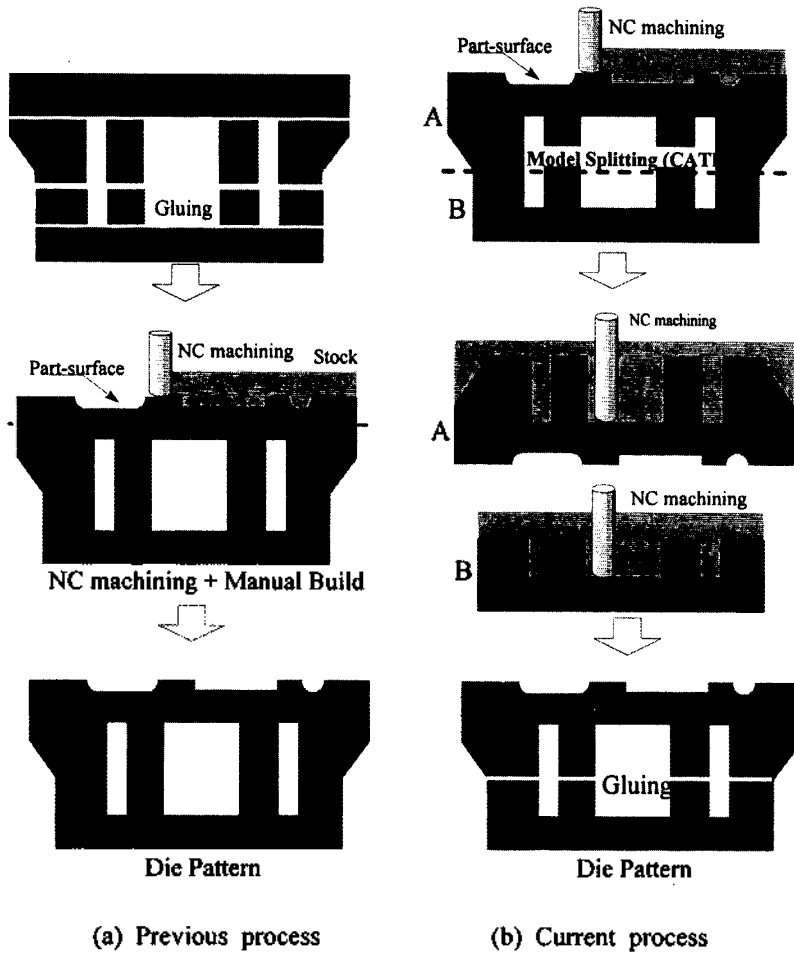


Fig. 1. Construction of Styrofoam-pattern.

TIA에서 구동할 수 있도록 구현하였다. Pattern-Master는 VAMOS 및 CATIA와는 별개의 독립된 시스템으로서, X/Motif 및 ANSI-C를 이용하여 UNIX 환경에서 작동한다. 또한, 본 시스템은 상업용 CAM 시스템인 Z-Master¹¹를 근간으로 함으로써 개발기간을 단축하였다.

2절에서는 이들 시스템간의 전체적인 구성 및 흐름을 보이고, 3절에서는 본 연구의 목표인 전용 CAM 시스템(Pattern-Master)의 기능을 설계하기 위한 정형화된 요구조건을 정리하였다. Pattern-Master의 세부적인 알고리즘 및 기능 구현을 4절에서 설명하고, 5절에서는 적용 사례를 보였다.

2. 패턴 제작과정 및 전체 시스템 구성

Fig. 2는 Pattern-Master 도입 후, 패턴의 형상 모델

링에서 가공데이터 생성까지의 전체적인 흐름을 보이고 있다(본 연구에서 개발한 부분은 CATIA 인터페이스 기능과 Pattern-Master이다).

본 연구의 목적과 관련되어 VAMOS 및 CATIA의 특징은 다음과 같이 정리할 수 있다.

● VAMOS

- 금형 형상 모델링용 솔리드 모델러,
- Mockup-solid(planar-face), exact-solid(자유곡면 face) 모델링,
- CATIA 시스템과의 직접적인 인터페이스 기능 (eg, CATIA 모델 파일 작성).

● CATIA

- 범용 CAD/CAM 시스템(eg, 모델링, NC 기능),
- 16차까지의 다항식(polynomial)으로 자유곡선/곡면 모델링,
- Mockup-solid(planar-face) 및 Exact-solid(자유곡

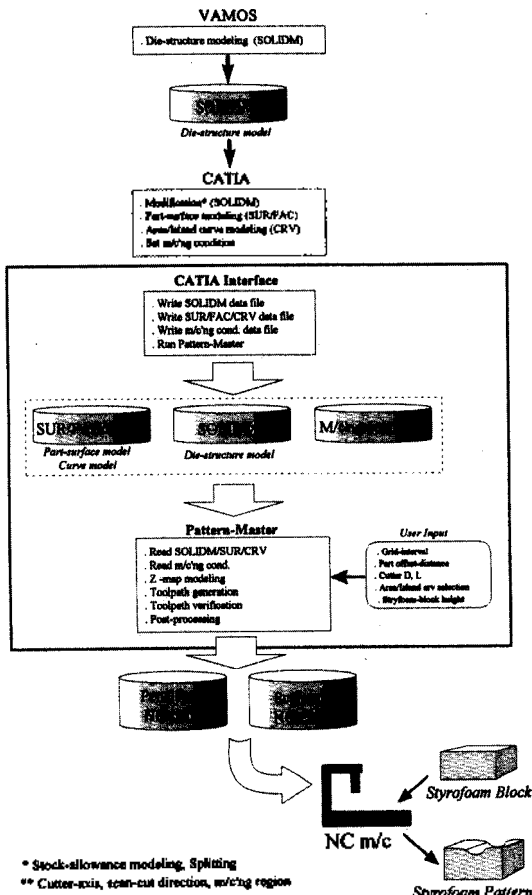


Fig. 2. Process & data flow of overall pattern construction.

면) 엔터티 및 CSG/B-Rep 모델링 지원,

- GII, CATGEO 등의 API(Application Program Interface) 라이브러리를 제공함으로써 각 엔터티의 내부 자료구조를 참조하거나 CATIA 기능으로서 사용자 인터페이스 구현이 가능.

VAMOS는 금형의 구조부(die-structure) 형상을 솔리드로 모델링 할 때 사용된다. 본 연구에서의 솔리드 모델은 CATIA에서 'mockup-solid'^[3](SOLIDM 엔터티)로 부르는 모델로써, 모든 면(face)은 평면으로 구성되어 있다(ie, planar-face). 이 구조부 솔리드 모델은 CATIA로 넘겨져서, 부분적인 가공여유 모델링 및 모델 분할(splitting) 과정을 거쳐 Pattern-Master에의 입력 준비를 마친다. 구조부의 경우 일반적인 3축 가공이 불가능한 형상을 많이 포함하고 있으며, 모델을 적절히 분할하지 않으면 가공이 불가능한 영역이 존재한다. 따라서, Pattern-Master에 입력되는 구조부 CAD 모델은 3축 가공이 가능한 공구 축방향

존재하도록 분할되어진다.

형상부(part-surface) 모델은 주로 CATIA에서 대개 변수형 자유곡면(trimmed parametric-surface: polynomial surface)으로 모델링한다. 또한, 공구 축방향, 가공영역 등의 가공조건도 CATIA 환경에서 입력할수 있도록 함으로써 사용자 편의성을 높이고자 하였다. NC 프로그래머가 CATIA에서 수행하는 작업과 각종 데이터 전달(ie, 인터페이스)에 대해서는 4.1절에서 자세하게 설명한다.

다음으로, Pattern-Master는 구조부 솔리드 모델, 형상부 자유곡면 모델 및 가공조건을 입력받아서, z-map^[4]을 기반으로 블랜드밀 공구에 대한 3축 펜슬가공^[5] 및 스캔(cartesian) 가공^[6]용 NC 데이터를 생성한다. 또한 생성된 가공데이터에 대해서는, 모의가공 및 검증 기능을 자동 수행함으로써, NC 프로그래머로 하여금 과절삭(gouge)^[4] 또는 공구와 형상간의 충돌(collision)을 사전에 확인할 수 있도록 한다. Fig. 3에서 본 논문의 주요 내용인 Pattern-Master의 내부 작업흐름을 도시하였으며, 세부 기능에 대해서는 4.2-4.4절에서 설명하였다.

NC 가공데이터 생성이 완료되면, 전용 NC 가공기 및 공구를 이용하여 스티로폼 블록을 가공함으로써 패턴을 제작한다. 참고로, 기존의 수작업에 의한 구조부 패턴 제작에서는 모퉁한 모서리 부위에 별도의 보강 스티로폼을 접착하였으나, NC 가공에 의한 제작시에는 블랜드밀 공구에 의한 필렛이 만들어진다.

3. 문제정의 및 전용 CAM 시스템의 요구기능

3.1 가공데이터 생성 조건

다음은 본 전용 CAM 시스템(Pattern-Master) 개발과 관련하여, 현장에서 요구하는 가공 데이터 생성의 몇가지 조건으로서, 이를 고려하여 Pattern-Master의 기능을 설계 하였다.

3.1.1 초기 피삭재 및 NC 가공기

초기 피삭재는 사각형 스티로폼 블록(block) 형태로 주어지며, NC 가공기는 스핀들 축에 2개의 회전축(A, B축)을 부가한 수직형이다. 회전축의 경우 다면가공을 위한 직교 인력상에 사용되며, 동시제어는 하지 아니한다. Heidenhein 컨트롤러를 채용하였으며, 통상 절삭가공시 이송속도(feedrate)는 9,000-10,000 mm/min, 스핀들 회전속도는 4,000 rpm을 적용한다.

3.1.2 형상부 주물여유 모델링

패턴의 형상부 및 구조부에 대한 초기 모델은 주

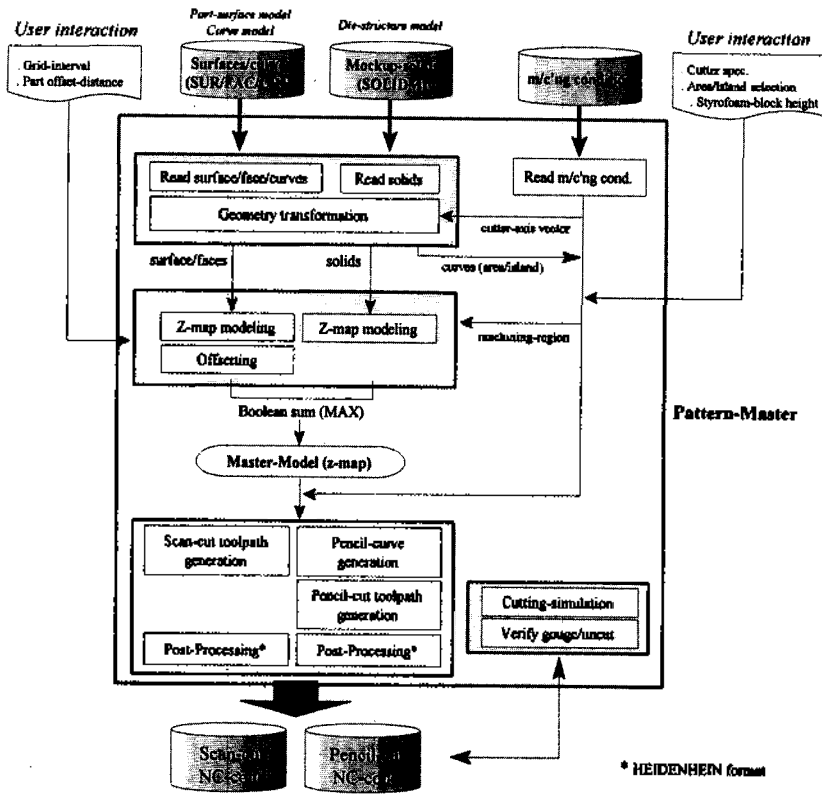


Fig. 3. Functional flow of Pattern-Master.

몰여유를 고려하지 아니한 모델이다. 현재 구조부의 경우에는, CATIA에서 주몰여유 형상을 솔리드 모델을 이용하여 모델링하고 있지만, 형상부에 대해서는 본 시스템에서 주몰여유(30~50 mm)를 모델링 하여야 한다. 이는 형상부를 구성하는 매개변수형 복합 곡면(compound-surface)에 대한 신속하고 안정된 옵션 기능을 필요로 한다.

3.1.3 공구특성 및 공구경로의 제약

공구는 볼앤드릴 형태의 축이 비어있는 전용 공구로서(직경 50.8 mm(2"), 길이 400 mm), Fig. 4에 공구의 형태를 도시하였다. 일반적인 절삭날은 없으며, 공구 표면에 존재하는 많은 돌기로 스티로폼을 절삭하도록 하였다(ie, '경사각' 등의 공구설정각은 정의하기 곤란하다). 절삭된 스티로폼은 공구표면에 뚫어 놓은 10개의 구멍(직경=10 mm)을 통해 공구 내부로 흡입·배출 하도록 되어 있다. 즉, 기능적인 측면에서는 '전드릴'과 유사하다고 볼수 있다.

본 전용공구는 수직하강 절삭(plunge-cut)시, 공구 바닥 중심부에서 스티로폼의 용융(melting)에 따른 구멍 막힘이 발생하여 원활한 흡입이 어려워 지고,

기계를 정지시켜 이를 제거해야 하는 문제가 발생한다. 따라서, 공구의 수직하강시에는 절삭을 수행할수 없고, 이미 절삭이 수행된 부위에 대해서만 공구의 수직하강을 허용한다(ie, air-cut만 허용). 본 연구에서는 펜슬가공이 이루어진 후 스캔가공을 행하는데, 이는 펜슬가공에 의해 수직벽 부위의 피삭재를 미리

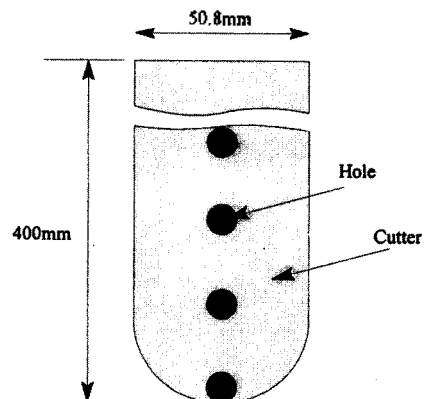


Fig. 4. Schematic view of the cutter.

제거함으로써 스캔가공시 수직하강을 염려하지 않도록 하기 위함이다. 단, 펜슬가공시에는 수직하강이 아닌 별도의 공구접근(cutter-approach) 방식을 고려할 필요가 있다.

3.1.4 가공정밀도 및 가공공정

스티로폼 패턴은 형상의 특성상 많은 코어, 구멍 및 수직벽이 존재하며, 피삭재의 특성상 가공정밀도(0.5~1 mm) 보다는 생산성을 중요한 요소로 다루고 있다. 여기에 더하여, 3.1.3의 조건과 관련해서는 수직벽 부위의 피삭재를 미리 제거할 필요가 있다. 이러한 목적으로 적합한 가공방식이 펜슬가공으로 사료되며⁶⁾, 이후 가공에서는 가능한 빠른시간에 잔여 피삭재를 제거할 수 있어야 한다. 또한 경우에 따라서는 제한된 영역에 대한 가공데이터를 생성하거나 일정 영역 외부에서의 가공데이터를 생성할 필요가 발생한다(ie, 영역가공).

3.1.5 공구의 과부하 방지

구조부의 경우 사각포켓 형태의 코어(core) 형상이 많이 존재하는데, 초기 피삭재가 블록형상임을 감안하여, 형상의 깊이가 공구길이보다 큰 경우에는 공구 부하를 감소시켜줄 필요가 생긴다. 따라서 공구이송 속도(feed-rate)를 줄이거나, 일정한 높이간격으로 가공 경로를 분할하는 다단 가공(z-leveling)을 필요로 한다.

3.1.6 공구경로의 검증

일반적인 금형가공과 마찬가지로 패턴의 NC 가공에서도 생성된 공구경로에 대한 과절삭, 미절삭 및 충돌 등에 대한 확인기능이 있어야 한다.

3.1.7 셋업횟수의 최소화

구조부 형상은 경우에 따라 xy 평면 이외의 4개 측면 부위에 대한 추가적인 가공이 필요하며, 이에 따라 셋업 횟수가 늘어나게 된다. 본 연구에서 사용하는 전용 NC 기계의 경우 3.1.1에서 밝혔듯이 스펀들 축에 2개 회전축을 부가하여 임의의 공구 축방향 설정이 가능하므로, 1회의 셋업으로 측면부위를 포함하는 모든 면의 가공이 가능하다. 현재는 각 면의 법선방향으로 공구 축방향을 설정하여 가공을 수행하도록 한다. 이와 같은 요구에 따라 xy 평면 이외에 yz 및 zx 평면상의 공구경로 생성기능(ie, 다면가공)을 필요로 한다.

3.1.8 CAD 모델 인터페이스

패턴의 구조부 및 형상부 CAD 모델은 별도의 시스템에서 모델링하며(ie, VAMOS, CATIA), 전용 CAM 시스템은 이들 CAD 모델을 입력받도록 한다. 따라서, CATIA의 mockup-솔리드, 다항식 곡면 및 곡선 자료를 적절한 방식으로 전달하여야 한다.

3.2 전용 CAM 시스템의 기능

3.1절의 조건들을 살펴볼 때, 가공 정밀도 보다는 생산성 향상이 중요한 요소임을 알 수 있다. 또한 공구 경로계획에 있어서도 3.1.3~3.1.5를 고려하여 공구 접근, 가공공정 등을 계획해야 하고, 생성된 가공데이터의 검증기능도 필요로 한다. 상기 조건으로부터 요구되는 주요 기능은 다음과 같이 정리 할 수 있다.

- 형상 모델링
 - CAD 모델 인터페이스(mock-up solid, polynomial surface/face/curve)
 - 형상곡면 오프셋팅(part-surface offsetting)
- 가공 공정
 - 펜슬 가공(pencil-machining)
 - 스캔 가공(parallel-to-plane machining: Cartesian machining)
 - 다단 가공(z-leveling)
- 공구 경로 생성
 - 공구 접근(cutter-approach)
 - 영역 가공(area/island-cut)
 - 다면 가공(multi-face machining)
- 공구경로 검증
 - 모의가공(cutting-simulation)
 - 과절삭, 미절삭 부위 검증(verification)

4. 전용 CAM 시스템의 구현

4.1 CATIA 인터페이스

4.1.1 형상 모델링 및 가공조건 지정

전용 CAM 시스템의 도입에 따라, NC 프로그래머가 CATIA에서 수행하는 작업은 형상 모델링 및 가공데이터 생성 준비 작업이다. 우선, VAMOS에서 모델링한 후 입력된 구조부 솔리드 모델에 대해서는 솔리드 프리미티브를 이용하여 부분적으로 가공영역을 추가 모델링 하며, 경우에 따라 3축 가공이 가능하도록 평면(z=d)으로 패턴 모델을 분할한다.

형상부 자유곡면 및 영역가공을 위한 곡선은 CATIA에서 모델링 한다. 또한 사용자 편의를 위하여, 가공조건 중 공구 축방향 벡터, 사각형 가공영역(machining-region), 스캔 가공방향은 CATIA 환경에서 입력할 수 있도록 CATIA GII 및 CATGEO library를 이용하여 구현하였다. Fig. 5는 CATIA에서 수행하는 작업과정을 도시하고 있다.

4.1.2 형상데이터 및 가공조건 전달

패턴의 형상모델은 mockup-solid 및 다항식 곡면(polynomial surface)으로 구성되며, 가공영역을 지정

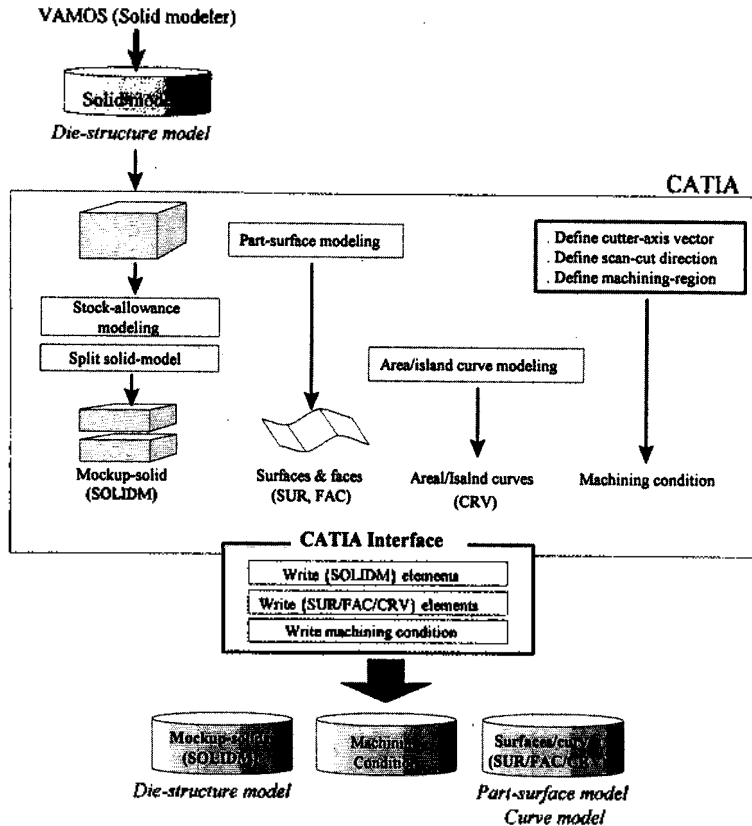


Fig. 5. Work processes with CATIA.

하기 위한 곡선 정보가 추가된다. 따라서 CATIA의 SOLIDM, SUR 및 FAC(곡면), CRV(곡선) 엔터티와 기타 가공조건 등의 기하정보에 대한 액세스가 필요하며, 본 연구에서는 CATIA의 GII 및 CATGEO 라이브러리를 활용하여 각 기하정보를 읽어와 아스키 파일로 작성토록 구현하였다. 즉, 솔리드, 곡면/곡선, 가공조건에 대한 3개의 아스키 파일을 작성한다.

곡면 및 곡선 엔터티는 IGES(Initial Graphics Exchange Specification)의 'fixed-line length' 포맷과 유사한 형식의 아스키 파일로 출력한다. 솔리드 엔터티는 다수의 면(planar face)을 가지며, 각 면은 평면 방정식, 점열로 이루어진 1개 이상의 경계곡선(loop)으로 정의된다. 이 정보 역시 별도의 포맷을 가지는 아스키 파일로 출력하도록 하였다. 상기 엔터티에 대한 자료구조는 별도의 참고문헌을 참조할수 있다³⁾.

다음은 CATIA의 형상정보 및 가공조건 정보의 출력을 위해 구현한 CATIA의 함수(function)로서, GUI 구현에는 CATIA GII command를 사용하며, 자료구조 액세스 및 출력에는 FORTRAN 언어 및 CA-

TIA CATGEO 라이브러리를 활용하였다. 또한 사용자 편의를 위하여, CATIA에서 직접 Pattern-Master를 구동할 수 있도록 하였다.

- Write SOLIDM data file
- Write(polynomial) SUR/FAC/CRV data file
- Define a rectangular domain on xy-plane(ie, machining-region)
- Define a rectangular domain on xy-, yz- or zx-plane(ie, machining-region & tool-axis vector)
- Run 'Pattern-Master'

4.2 패턴형상 모델링

4.2.1 형상부 곡면의 z-map 모델링

일반적으로 금형의 형상부 곡면은 수백~수천 개의 매개변수형 곡면으로 구성되는 복합곡면이므로, 매개변수형 곡면의 읍셋 또는 CL(cutter-location) 곡면을 계산하고, 가공레이터를 생성하는 문제가 간단하지 아니하다. 따라서, 주어진 가공공차(machining tolerance)를 만족하는 범위에서 빠른 시간에 안정적으로 읍셋곡면을 생성할수 있는 방안이 있어야 하는

데, 일반적으로는 이와 같은 목적으로 이산곡면(discrete-surface) 모델을 활용하고 있다. 현재 채용되는 이산곡면 모델로는 다면체 모델(polyhedron model)^{7,8)}이나 z-map 모델^{2,5,9)}을 찾아볼 수 있으며, 본 연구에서는 z-map 모델을 사용하였다.

Z-map은 비매개변수형 곡면의 특수한 형태로서, xy 평면(domain)에 정의된 격자점(grid-point)에서의 높이값을 2차원 배열 $Z[i, j]$ 형식으로 저장하고 있다. 우선 z-map의 2차원 영역(domain)을 정의하기 위하여, x, y 평면위에 형상곡면을 포함하는 "majorizing-box"를 정의한다. Majorizing box의 좌하단 모서리 점을 (x_o, y_o) , 폭은 W, 높이는 H로 놓았을 때 z-map 격자점(i, j)의 좌표 (x_i, y_i) 는 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$x_i = x_o + \gamma i \text{ and } y_j = y_o + \gamma j$$

$$\text{for } i \in [0, M] \text{ and } j \in [0, N], \quad (1)$$

여기서, γ 는 격자간격(grid-interval),
i와 j는 2차원 배열의 인덱스(정수),
 $M(=W/\gamma)$, $N(=H/\gamma)$ 은 배열의 크기(정수).

매개변수형 곡면을 z-map으로 변환하는 문제는 z-map 격자점의 높이값 $Z[i, j]$ 를 계산하는 문제이며, 이는 격자점에 놓인 수직선과 곡면간의 교점을 계산하는 '2D Jacobian Inversion'¹⁰⁾이라 불리는 알고리즘을 사용하였다. 본 시스템에서 z-map 격자간격의 기본값은 1 mm이고, 프로그래머가 이를 변경할 수 있다. 매개변수형 곡면의 z-map 변환 알고리즘은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- Make_ParamSurface_Zmap($\{F_k\}$, M, $\gamma \Rightarrow Z[i, j]$);
1. Input: Trimmed parametric surfaces(faces) $\{F_k\}$, Z-map domain M, Z-map grid-interval γ
 2. Construct an initial z-map $Z[i, j] \leftarrow M, \gamma$
 3. For all k do {
Convert periphery & hole loops to 2D area & island curves $A_k, \{F_k\} \leftarrow F_k$;
For all grid-points $(i, j) \in A_k$ and $\notin \{F_k\}$, compute $Z[i, j]$ by 2D_Jacobian_Inversion;
}
 4. Return $Z[i, j]$;

4.2.2 형상부 곡면 옵셋팅

금형 형상부(part-surface)를 표현하는 매개변수형 곡면에 대해서는 전체 형상부 곡면의 볼 옵셋팅(ie, 주물여유)이 필요하다. 일반적인 매개변수형 곡면 $r(u, v)$ 에 대한 볼엔드밀 공구의 옵셋곡면 $r^o(u, v)$ 은 식

(2)로 나타낼 수 있다¹¹⁾.

$$r^o(u, v) = r(u, v) + R \cdot n(u, v) \quad (2)$$

여기서, R = 공구반경,
 $n(u, v) = (u, v)$ 에서의 단위법선벡터.

그러나, 이러한 매개변수형 복합곡면에 대한 옵셋 곡면 계산이 용이하지 않으므로, 매개변수형 곡면을 z-map으로 변환한후 z-map에 대한 옵셋을 적용 하였다. Z-map의 볼 옵셋곡면 계산방법으로는 inverse offset method¹⁴⁾가 대표적인데, 각 격자점(m, n)에서 "offset z-map"의 z값은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$Z_o[m, n] = \max\{Z[i, j] + B(i, j, m, n, R)\};$$

$$(i, j) \in I(m, n, R) \quad (3)$$

여기서,
 $I(m, n, R) = \{(i, j) | ((x_i - x_m)^2 + (y_j - y_n)^2) \leq R^2\}$,
 $B(i, j, m, n, R) = (R^2 - ((x_m - x_i)^2 + (y_n - y_j)^2))^{1/2}$,
 x_i, x_m, y_j, y_n 은 식 (1)에서,
R:옵셋 거리(또는 볼 반경).

이때, " $Z[i, j] + B(i, j, m, n, R)$ "는 볼 중심점이 $p_i = (x_i, y_i, Z[i, j])$ 일 때 격자점(m, n)에서 상반구의 높이(z) 값을 나타낸다. 이 방식의 경우 계산과정은 간단하지만, 실제 적용에 있어서는 다양한 방식으로 계산 시간을 줄이는 노력이 필요하다. 예를 들어, 격자점(i, j)에 반경 R의 볼 중심점을 놓았을 때 높이값을 계산해야 하는 영역은 반경이 R인 원이 되지만, 실제로는(i, j)의 전후좌우 격자점에 놓이는 볼에 의해 계산되는 영역을 제외함으로써 계산영역을 최소화 할 수 있다. Fig. 6에서는 격자점(i-1, j)에 놓이는 볼과의 관계로부터 -x 방향의 계산영역(L)을 보이고 있으며, L은 식 (4)로 계산된다.

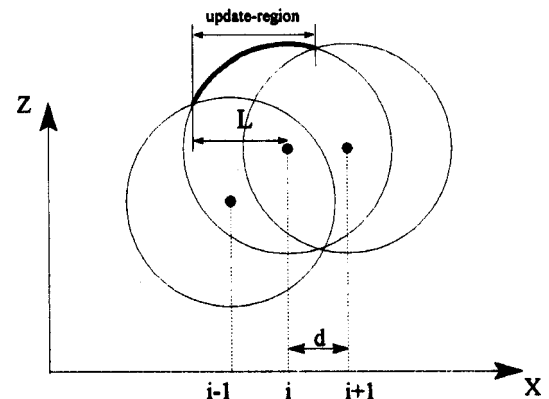


Fig. 6. Optimized ball-update-region.

$$L = \begin{cases} -d/2 - h(R^2/(d^2+h^2) - 1/4)^2, & h < \sqrt{2Rd-d^2} \\ -R, & h \geq \sqrt{2Rd-d^2} \end{cases} \quad (4)$$

여기서, d = 격자간격, $h = |Z[i, j] - Z[i-1, j]|$,
 R = 공구반경.

이와 같은 방식으로 격자점 $(i-1, j)$, $(i+1, j)$, $(i, j-1)$, $(i, j+1)$ 과의 관계에 의해 각각의 L (ie, L_{-x} , L_{+x} , L_{-y} , L_{+y})을 결정하면, 격자점 (i, j) 에 놓이는 볼에 대한 의미있는 사각형 계산영역을 구할 수 있다. 다음은 z-map 읍셋팅의 과정이다.

Construct_Offset_Zmap ($Zm[i, j]$, $\delta \Rightarrow Z[i, j]$);

1. Input: Model z-map $Zm[i, j]$, offset-distance δ ;
2. Make a copy of model z-map $\rightarrow Z[i, j]$;
3. For all i, j do {
 Compute update-region $\{L_{-x}, L_{+x}, L_{-y}, L_{+y}\}$ by equation (4);
 Compose the rectangular update-region D from $\{L_{-x}, L_{+x}, L_{-y}, L_{+y}\}$;
 For all grid-points $(m, n) \in D$, update $Z[m, n]$ by equation(3);
 }

4. Return $Z[i, j]$;

4.2.3 패턴 모델의 z-map 모델링

형상부에 대해서는 매개변수형 곡면의 z-map 모델을 구축한 후, z-map 읍셋팅을 통하여 주볼여유를 표현하였다. 구조부를 표현하는 솔리드 모델에 대해서는 각 면(facc)의 경계곡선(periphery & hole loop) 및 평면 방정식으로부터 유효한 면의 내부에 들어오는 격자점의 높이값을 계산하여 z-map을 만든다.

Pattern-Master에 입력되는 패턴 모델은 (1) 구조부 또는 (2) 구조부+형상부로 구분되며, 어느 경우이나 최종적으로는 전체 형상을 단일 z-map으로 모델링하고 이를 'master-model' z-map으로 부른다. (1)의 경우에는 구조부 솔리드 모델만을 z-map으로 변환

하는 과정을 거친다. (2)의 경우에는 형상부 z-map을 구축하여 읍셋팅과정(ie, 주볼여유 표현)을 거친 후, 구조부 z-map과의 불리언 연산으로 단일 z-map을 구축한다. 이때, z-map의 xy-영역은 입력으로 들어오는 사각형 가공영역으로 주어진다.

이와 같은 master-model z-map $Z[i, j]$ 를 구축하는 전체적인 과정은 다음과 같이 정리할 수 있다.

Construct_MasterModel_Zmap ($\{F_k\}$, $\{S_k\}$, M , γ , $\delta \Rightarrow Z[i, j]$)

1. Input: Part-surface(trimmed parametric surfaces) $\{F_k\}$, Mockup-solid $\{S_k\}$, grid-interval γ , Machining-region M , part-surface offset-distance(casting-allowance) δ ;
2. if $\{F_k\} \neq \text{"Null"}$ then {
 call **Make_ParamSurface_Zmap** ($\{F_k\}$, M , $\gamma \Rightarrow Zp[i, j]$);
 if $\delta > 0$ then call **Construct_Offset_Zmap** ($Zp[i, j]$, $\delta \Rightarrow Zp[i, j]$);
 call **Make_MockupSolid_Zmap** ($\{S_k\}$, M , $\gamma \Rightarrow Zs[i, j]$);
 for all i, j do $Z[i, j] = \text{MAX}(Zp[i, j], Zs[i, j])$;
 } else call **Make_MockupSolid_Zmap** ($\{S_k\}$, M , $\gamma \Rightarrow Z[i, j]$);
3. Return $Z[i, j]$;

4.3 가공 공정

4.3.1 펜슬 및 스캔 가공

금형의 펜슬 가공(pencil-machining)은 형상의 오목한 모서리 부위를 따라가는 볼엔드 밀 가공이며 (Fig. 7), 스티로폼 패턴 가공에서는 오목한 모서리 부위에 존재하는 피삭재를 미리 제거함으로써 스캔 가공경로의 수직하강시 절삭이 발생하지 않도록 하는 효과와, 수직벽 부위를 매끄럽게 처리하는 효과를 가진다. 이후, 스캔 가공(parallel-to-plane machining)은 남아있는 대부분의 피삭재를 제거하는 것

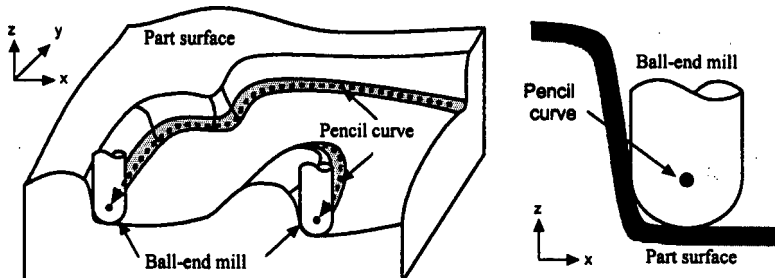


Fig. 7. Pencil-machining.

을 주 목적으로 한다. 구체적인 가공데이터 생성 절차는 4.4.2절에서 설명한다.

4.3.2 다단 가공

스티로폼 블록의 초기 높이(raw-stock height: H)와 공구 CL 데이터의 z값의 차이가 공구길이(L)보다 클 경우에는, xy 평면상의 동일한 가공경로에 대해 z값을 달리하여 여러번 가공함으로써 공구부하를 줄일 필요가 있다. 펜슬가공에 대해서는 계산된 펜슬곡선으로부터 추가의 가공데이터를 본 시스템에서 생성하도록 하였으며, 스캔가공의 경우에는 데이터의 양이 많아지는 관계로 필요할 경우 NC 작업자로 하여금 다단가공을 행하도록 하고 있다.

펜슬가공의 경우, i-번째 펜슬곡선(CV_i⁰={P_j; j=1, ..., m})에 대해 h_{max}=MAX{H-z_j; V_{j}}를 계산하여, h_{max}>L인 경우에는 +z 방향으로 L만큼 평행이동한 또 하나의 펜슬곡선(CV_i¹)을 계산한 후 이 곡선을 공구경로에 추가하도록 하였다. 이러한 과정은 CV_i⁰이 h_{max}≤L을 만족할 때까지 되풀이 되며, 실제 가공에 있어서는 최상위 펜슬곡선 CV_i⁰부터 CV_iⁿ까지 순차적인 가공이 이루어지도록 한다(Fig. 8).

4.4 공구경로 생성 및 검증

4.4.1 공구 접근

펜슬 가공은 피삭재가 전혀 제거되지 않은 블록을 가공하기 때문에, 2절에서 언급한 이유로 인하여 수직하강(plunge-cut) 이외의 공구접근 방식을 필요로 한다. 본 시스템에서는 수직하강이 없는 공구접근 방식으로서, (1) 나선접근(helical-approach) 또는 (2) 공구축벡터와 일정각도를 유지하면서 직선으로 접근하는 경사접근(sloped-approach)의 두 가지 방식을 채택하였다. 경사접근 방식은 주변 형상 등의 제약으로 나선접근이 불가능할 때 채택하는 방식이며,

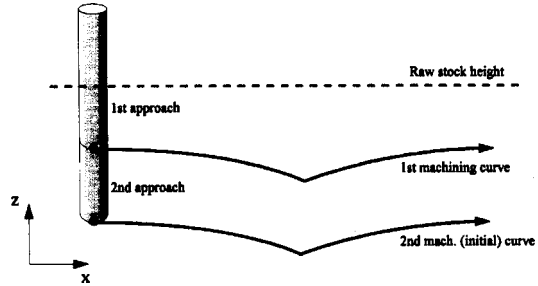


Fig. 8. Z-leveling of pencil-machining.

공구 축벡터와 직선(ie, 접근경로)간의 각도는 공구와 형상모델간의 충돌이 발생하지 않는 최대각도를 채택한다.

본 시스템에서의 나선접근경로는 식 (5)와 같은 좌수원호나선(left-handed circular-helix)이며(Fig. 9), CL 데이터는 나선상에서 추출한 점열(point-sequence) 데이터로 생성한다. 이때, 나선상의 점 P_s는 블록의 초기높이 H로 결정한다.

$$r(t) = (R \cdot \cos t, R \cdot \sin t, c \cdot t), \tag{5}$$

여기서, $0 \leq t \leq 2\pi$,

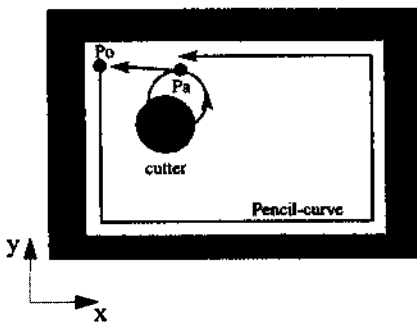
R=공구반경,

$$c = -2 \cdot R \cdot \tan \theta / \pi,$$

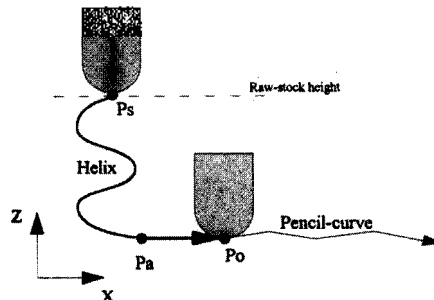
$$\theta = \pi/6.$$

4.4.2 펜슬 및 스캔 가공경로 생성

펜슬 가공경로를 생성하기 위해서는 점연속으로 이루어진 펜슬곡선(pencil-curve)들을 계산해야 하며, 펜슬곡선상의 점데이터는 볼렌드밀 공구 중심점에 해당한다(Fig. 7). 본 연구에서 적용한 펜슬가공경로 생성에 대한 자세한 내용은 참고문헌 [5]에 나타나 있다. 전체 패턴모델에 대한 다수의 펜슬곡선은 한 곡선의 끝점과 다른 펜슬곡선의 시작점까지의 3차원



(a) Horizontal-view



(b) Vertical-view

Fig. 9. Helical cutter-approach.

거리를 기준으로 순차적으로 연결함으로써 공구가 동시 시간을 줄이고자 하였다. 다음은 다단가공이 없는 경우의 펜슬 가공데이터 생성 과정이다.

Generate_Pencil_NC(Z[i, j], R, $\epsilon \Rightarrow$ NCfile)

1. Input: Master-model z-map Z[i, j], cutter-radius R, machining-tolerance ϵ ;
2. Compute pencil-curves {CV_i: i=1, ..., n} \leftarrow Z[i, j], R;
3. Set i=1; count=1;
4. Write CL-data file \leftarrow CV_i;
5. Set CCV=CV_i, EP=end point of CCV;
6. Find next curve CV_i with min. |SP-EP|, where SP=start-point of CV_i;
7. Jump-link between CCV and CV_i; count ++;
8. Write CL-data file \leftarrow Jump-link path, CV_i;
9. If count < n then goto 5;
10. call Postprocessing("Heidenhein", CLfile, $\epsilon \Rightarrow$ NCfile);

스캔 가공데이터 생성은 4.2절에서 모델링한 master-model z-map으로부터, z-map 옵셋팅 과정을 거쳐 볼 엔드밀 공구에 대한 CL z-map을 구축하여 CL-Cartesian 방식의 공구경로를 생성하도록 하였다. 본 패턴 가공에서는 x 또는 y축과 평행한 경우만을 고려하였으며, 경로간격(path-interval)은 통상적으로 8 mm이다. 또한 영역가공 곡선이 있을 경우, 영역가공 데이터를 생성한다. 다음은 가공데이터 생성 과정이다.

Generate_Scan_NC(Z[i, j], R, {A_k}, {I_k}, D, $\epsilon \Rightarrow$ NCfile)

1. Input: Master-model z-map Z[i, j], cutter-radius R, area-curves {A_k}, island-curves {I_k}, scanning-direction D, machining-tolerance ϵ ;
2. call Construct_Offset_Zmap(Z[i, j], R \Rightarrow Zo[i, j]);
3. Compute/write Cartesian CL-paths \leftarrow Zo[i, j], {A_k}, {I_k}, D;
4. call Postprocessing("Heidenhein", CLfile, $\epsilon \Rightarrow$ NCfile);

4.4.3 다면 가공

본 연구에서의 다면가공은 xy 뿐만 아니라 yz, zx 평면에 대한 펜슬 및 스캔 가공 데이터를 생성하여야 한다. 기존 xy 평면상의 가공데이터 생성기능을 활용하는 측면에서, 입력된 모든 기하정보(eg, 모델 곡면에 공구 축벡터(t_x, t_y, t_z) \rightarrow (0, 0, 1))이 되는 변환

M을 적용함으로써 시스템 내부적으로는 xy 평면상의 가공데이터 생성기능을 그대로 적용할 수 있도록 하였다. 이때, 생성된 CL 데이터에 대해서는 다시 역변환 M⁻¹을 적용하여야 한다.

4.4.4 Post-Processing

본 연구에서 적용한 NC 기계는 Heidenhein 컨트롤러를 사용하고 있다. 따라서, 펜슬 및 스캔 가공을 위한 CL 데이터를 계산한 후, post-processing을 통하여 NC 코드를 생성하도록 하였다. 본 연구에서의 post-processing은 기존 Z-Master 시스템의 라이브러리를 활용하였다.

4.4.5 공구경로 검증

본 시스템에서는 펜슬 및 스캔 가공용 NC 데이터 생성 후 모든 공구경로에 대해 자동 공구경로 검증을 수행하도록 하였다. 본 시스템은 기존의 상업용 CAM 시스템인 Z-Master[®]의 틀 속에서 다양한 라이브러리들을 사용하였으며, 모의가공 및 검증 기능은 그 중의 하나이다. 이에 관한 자세한 기술적인 내용은 참고문헌 [10]을 참조할 수 있다.

우선, 모의가공은 피삭재 z-map에 대해 볼엔드밀 공구경로의 모의가공을 수행한다. 이때 초기 피삭재는 주어진 패턴 모델을 포함하는(이때 xy-domain은 변화가 없다) 사각 블록으로 간주한다. 모의가공이 완료되면 피삭재 모델 z-map(Zw)을 얻을 수 있으며, 앞서 계산한 형상모델 z-map(Zm)과의 차(difference) z-map Zd(=Zw-Zm)를 계산할 수 있다. 이러한 차 z-map으로부터 과절삭 및 미절삭 영역을 쉽게 찾을 수 있다.

여기에서, 차 z-map을 계산하는 방식은 크게 두 가지가 있는데, Zm의 격자점에서 Zw와의 거리를 계산하는 방향에 따라 각각 'z-방향 차이(z-difference)' 및 '법선방향 차이(normal-difference)'로 구분한다. 전자의 경우에는 Zm과 Zw의 각 대응 격자점에서 z 방향으로의 높이값 차이만을 계산하므로 계산이 간단한 반면, 경사진 영역에서는 실제보다 큰 값을 나타낼 수 있다. 후자의 경우는, Zm의 격자점에서의 법선벡터 N(i, j)로부터 $\pm N(i, j)$ 방향으로 Zw까지의 거리를 계산하게 되는데, 앞서의 단점을 보완할 수 있는 반면 법선벡터 계산이 다소 부정확할 수 있다.

어느 경우에도 차 z-map의 격자점 높이값으로부터 두 z-map간의 거리와 부호를 알 수 있다. 따라서, 이 정보로부터 피삭재 모델과 형상 모델간의 차이를 판단할 수 있으며, 형상 모델 z-map상에서 이 정보를 색깔로 표현함으로써 사용자가 과절삭 및 미절삭

부위를 알 수 있도록 하였다.

5. 적용 사례

본 절에서는 프레스 금형 패턴의 CAD 모델로부터 가공데이터 생성 예를 보이고, 기존의 제작 방식과 비교하여 생산성 향상을 살펴본다. Fig. 10은 3개 부분으로 구성되는 자동차 후드 외판 금형 세트를 보이고 있다. 각 부분의 명칭은 위에서부터 'punch-shoe', 'die-post', 및 'ring'이다.

Fig. 11은 'punch-shoe'의 분할된 솔리드 모델에 대한 master-model z-map(격자간격=1 mm)이며, 직경 2" 볼엔드밀 공구에 대한 펜슬 및 스캔 가공데이터

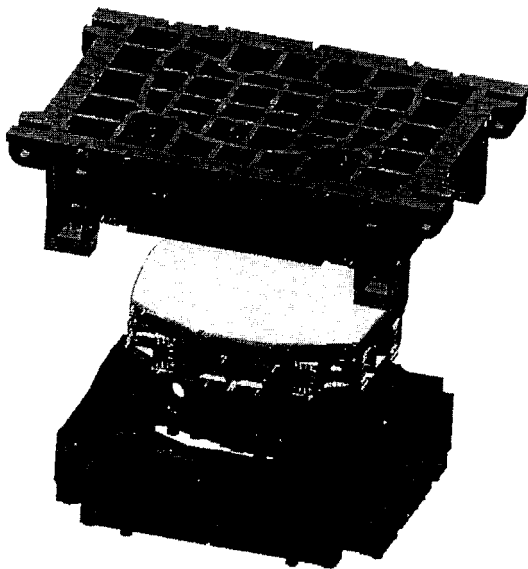


Fig. 10. Hood outer panel die.

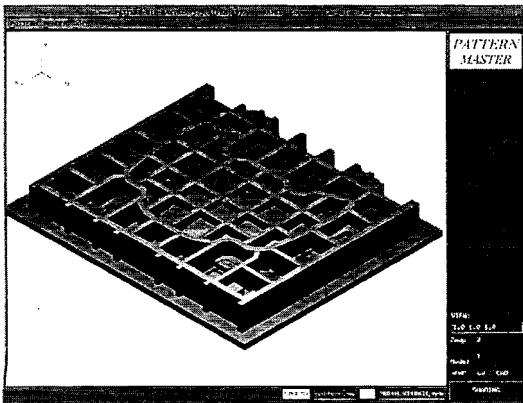
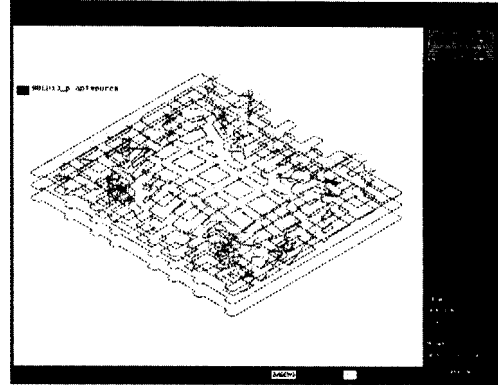
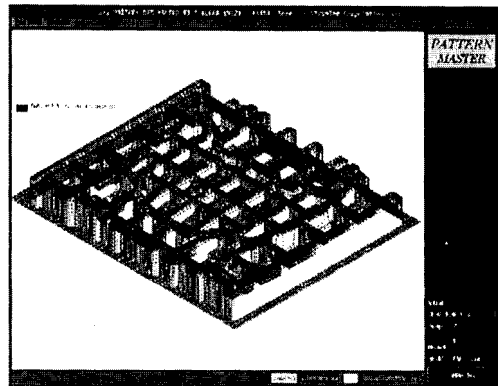


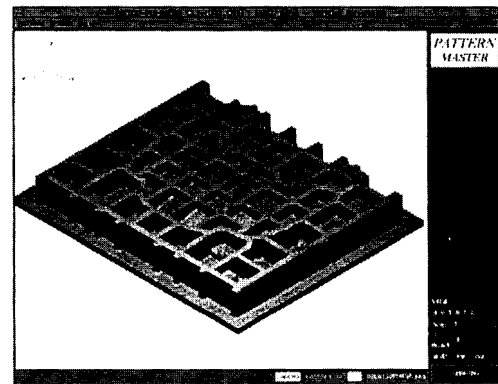
Fig. 11. Master model z-map.



(a) Pencil-machining toolpath



(b) Parallel-to-plane toolpath



(c) Cutting-simulation

Fig. 12. Machining toolpath and cutting-simulation.

를 생성한다(Fig. 12-a, b). 펜슬 가공의 경우 나선절근 및 다단가공을 확인할 수 있다. 그리고, 이들 가공데이터에 대한 모의가공을 통하여 실제 파절삭 및 미절삭을 확인할 한다(Fig. 12-c).

Table 1은 Fig. 10에서 보인 금형 모델에 대해, 형

Table 1. Bench mark result of previous & current processes

Previos		Current	
Process	Time (hr)	Process	Time (hr)
Manual build(die-structure)	80	Sold modification*	10
NC programming**(part-surface of die-post)	8	NC programming***(punch-shoe, die-post, ring)	5
NC machining(feedrate=10 m/min)	2	NC machining(feedrate=10 m/min)	9
Total	90	Total	24

*casting-allowance modeling, splitting

**CATIA

***Pattern-Master

상 모델이 준비된 상태에서 기존의 제작 방식(Fig. 1-a)과의 비교를 보이고 있다. 기존의 수작업이 포함된 경우에 비해 약 1/4 가량의 시간이 소모되었음을 알 수 있다.

6. 결론 및 고찰

본 연구는 자동차 프레스 금형의 스티로폼 패턴 가공용 전용 CAM 시스템의 개발에 관해 다루었다. 본 시스템은 별도의 CAD 시스템에서 모델링된 금형 패턴의 형상 모델을 입력 받은 후, z-map을 기반 곡면으로 볼랜드밀 공구에 대한 펜슬 및 스캔 가공 NC 데이터 생성 및 공구경로 검증기능을 가진다.

일반적인 상용 CAM 시스템과 비교하였을 때, 본 전용 CAM 시스템의 특징 및 장점은 다음과 같이 정리할 수 있겠다. 즉,

- 스티로폼 패턴 가공용 전용 CAM 시스템,
- NC 프로그래머의 상호작용(interaction) 최소화,
- 솔리드 및 자유곡면으로 모델링된 패턴형상에 대한 정형화된 NC 데이터 자동 생성,
- 생성된 NC 데이터의 자동 검증.

현재 Chrysler 자동차 MET&D(Mount-Eliot Tool & Die) 공장의 경우 10여명의 NC 프로그래머가 본 시스템을 사용하고 있으며, 본 시스템의 활용으로 다음과 같은 문제 해결 및 효과를 얻은 것으로 사료된다.

- 구조부 패턴 제작의 수작업으로 인한 과다 공수 문제:
 - ▶ 구조부 가공에 NC 가공 적용
 - 생산성 증가(평균 3배),
- 범용 시스템 사용 및 프로그래머의 숙련도에 따른 NC 데이터 생성시간 및 품질 차이 문제:
 - ▶ 전용 CAM 시스템 적용
 - ▶ 프로그래머의 상호작용 최소화

▶ NC 데이터 자동 생성 및 검증

→ NC 데이터 생성 시간 단축 및 균질화, 가공 오류 사전 파악.

현재, 스캔가공 및 펜슬가공 이외에, 금형 구조부의 사각 블록형상(코어부위)에 대해서는 2차원 pocketing 방식의 가공경로 생성요구가 있으며, 볼랜드밀 이외에 필렛엔드밀(filleted-end mill) 공구의 사용 또한 고려하고 있다.

참고문헌

1. Z-Master Reference Manual, Cubic Tek, Korea, 1992.
2. Choi, Byoung K. et al., "Unified CAM-system architecture for die and mold manufacturing", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp.235-243, 1994.
3. CATIA API Reference Manual, Dassault Systems, 1996.
4. Choi, Byoung K., *Surface modeling for CAD/CAM*, Elsevier, 1991.
5. 박정환, 김보현, 최병규, "가상측정을 통한 펜슬곡선 추적", 한국 CAD/CAM 학회지, Vol. 2, No. 4, pp. 253-266, 1997.
6. 최병규외, CAD/CAM 시스템과 CNC 절삭가공, 회중당, 1996.
7. Li, S. X. and Jerard, R. B., "5-axis machining of sculptured surfaces with a flat-end cutter", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 3, pp.165-178, 1994.
8. Hwang, J. S., "Interference-free tool-path generation in the NC machining of parametric compound surfaces", *Computer-Aided Design*, Vol. 24, No. 12, pp. 667-676, 1992.
9. Takeuchi, Y. et al., "Development of a personal CAD/CAM system for mold manufacturing", *Annals of CIRP*, Vol. 38, No. 1, pp.429-432, 1989.

10. 정연찬, "금형가공용 통합 CAM 시스템을 위한 가공데이터의 모의가공과 검증에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원, 1996.



박 정 환

1987년 서울대 물리학과 학사
1990년 KAIST 산업공학과 석사
1995년 KAIST 산업공학과 박사
1995년 ~ 1997년 Chrysler Technology Center 연구원
1997년 ~ 현재 영남대학교 기계공학부 전임강사
관심분야: CAD/CAM, 5축 NC 가공, Surface Modeling