

파라메트릭 접근방법에 의한 특징형상을 이용한 모델링

이재열* · 김광수**

A Parametric Approach to Feature-based Modeling

Jae-Yeol Lee* and Kwang-Soo Kim**

ABSTRACT

Although feature-based design is a promising approach to fully integrating CAD/CAM, current feature-based design approaches seldom provide methodologies to easily define and design features. This paper proposes a new approach to integrating parametric design with feature-based design to overcome those limitations by globally decomposing a design into a set of features and locally defining and positioning each feature by geometric constraints. Each feature is defined as a parametric shape which consists of a feature section, attributes, and a set of constraints. The generalized sketching and sweeping techniques are used to simplify the process of designing features. The proposed approach is knowledge-based and its computational efficiency in geometric reasoning is improved greatly. Parametrically designed features not only have the advantage of allowing users to efficiently perform design changes, but also provide designers with a natural design environment in which they can do their work more naturally and creatively.

Keywords : Feature-based design, Parametric design, Geometric constraints, Constraint graph

1. 서 론

제품의 다양화와 복잡한 형상을 가진 제품의 증가에 따라 3차원 형상의 설계 및 가공 방법에 대한 연구가 집중되고 있다. 특히 3차원 상에서 완전한 형상 정보(geometric & topological information)를 제공하는 솔리드 모델링(CSG와 B-rep 방법)에 관하여 많은 연구가 진행되어 현재 컴퓨터 그래픽스, 3D 디자인, 공학해석 등 많은 분야에 사용되고 있다. 그러나, 솔리드 모델은 주로 면, 루프, 모서리, 그리고 꼭지점과 같은 하위 형상정보로 정의되어 단순히 외부형상을 정의하는데 사용되었다. 그렇지만, 생산자동화를 이루기 위해서 필요한 1) 구속조건(constraint), 2)디자인 의도(design intent), 3)공정계획(process planning)에서 아주 중요한 특성들 표면 거칠기, 여유공차, 재질 등 상위 정보는 수용할 수가 없었다. 이러한 문제

점을 해결하고 CAD/CAM의 통합화를 이루기 위해 설계단계에서 생산정보를 디자인과 결부시킨 특징형상 기반 설계(feature-based design)에 관하여 많은 연구가 이루어지고 있다¹⁻⁴. 즉, 홀, 슬롯, 포켓, 그리고 라운딩 등과 같은 특징형상은 기하 및 위상학적인 정보 뿐만 아니라 생산정보(product information)를 동시에 지니고 있기 때문에 사용자로 하여금 하위 형상정보가 아닌 상위 정보(high-level abstractions)로 설계가 가능하게 한다.

이러한 상위 정보로 설계를 하기 위해서는 무엇보다도 특징형상 정의 및 설계의 용이성(easy definition and design of features)이 무엇보다도 중요하다. 그렇지만 기존의 대부분의 연구결과들은 주로 특정한 응용분야에 필요한 특징형상을 미리 정의하고 이를 바탕으로 하여 설계가 가능하였으며 비록 새롭게 정의할 수 있더라도 정의 방법이 어렵고 많은 프로그래밍 기법을 필요로 하고 특히 생산자의 입장에서 설계하는데 중점을 많이 두었다. 그러나 설계자의 관점에서 필요한 특징형상 정의 및 디자인 방법에 관해서는 중

*학생회원, 포항공과대학교 산업공학과

**종신회원, 포항공과대학교 산업공학과

요성에 비하여 그리 많은 연구가 진행되지는 않았다. 설계자 측면에서는 1) 특징형상 정의의 용이성, 2)형상수정의 용이성, 그리고 3)특징형상들간의 유효성 확인(validation check)의 용이성 등이 무엇보다도 중요하다.

일반적으로 제품 개발과정에서는 디자인 기능성(functionality), 가공성(manufacturability), 그리고 품질(quality)을 가능한 높이기 위해서 여러 번의 설계 수정과정이 필요하다. 이러한 과정, 특히 설계 초기 과정에서 사용자는 우선 제품 모델의 개략적인 스케치(rough sketch)로 시작한다. 아이디어가 점진적으로 구체화되면서 초기 설계 모델에 많은 형상 수정을 가하여 최종제품의 설계를 완성한다. 이처럼 모든 디자인 활동은 주로 반복적인 작업이기 때문에 사용자에게는 가능한 유연한 제품 설계 시스템이 무엇보다도 중요하다. 이러한 유연한 설계 과정은 파라메트릭 (또는 variational) 디자인 기법에 의해서 이루어질 수 있다^{17,12)}.

특징형상 모델링은 CAD 모델을 여러 가지 상위레벨의 특징형상의 집합으로 표현하고 파라메트릭 디자인은 사용자로 하여금 특징형상을 기하 및 수치정보로 표현하여 형상의 추가 및 변경을 용이하게 해준다. 예를 들면 Pro/ENGINEER는 이러한 개념을 기초로 하여 성공한 대표적인 상업용 CAD/CAM 소프트웨어이다. 하지만, 구체적으로 어떻게 구현되었는지는 문헌으로 잘 나와있지 않다. 본 연구에서는 특징형상 기반 파라메트릭 모델링(feature-based parametric modeling)을 위한 새로운 방법론을 제시한다. 이는 지식기반 접근방법(knowledge-based approach)에 바탕을 두고 있는데 이 방법론의 단점인 추론시간(inference time)을 줄이기 위하여 그래프를 이용한 새로운 추론 알고리즘을 사용한다. 그리고, 이 접근방법의 장점인 지식기반 CAD로의 확장 용이성을 그대로 유지한다. 제시된 방법론은 크게 두 가지 과정에 근거를 둔다: 1)전체적으로는 최종 디자인 모델을 연속적인 특징형상의 집합으로 표현하고, 2)개별적으로는 특징형상을 구속조건에 의해서 상대적으로 위치시키고 정의한다. 특히, 특징형상 모델 정보는 CSG와 B-rep 모델에 분리되어 저장되어 있다. CSG 모델은 기존의 솔리드 모델과 독립적이며, 각 특징형상 정보, 구속조건, 그리고 파라메트릭 정보를 저장하고 있으며, 반면에 B-rep 모델은 ACIS™ 모델러에 의한 최종적인 솔리드 형상정보를 담고 있다. 이러한 특징형상 정보의 분리는 B-rep의 최종형상정보의 교환 뿐만 아니라 특징형상 정보 및 가공형상 정보의 교환을 용이하게 하기 위한

것이다. 그리고, 파라메트릭 디자인 기능을 용이하게 수행하는데 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2절에서는 기존의 연구 결과 (특징형상 디자인과 파라메트릭 디자인)에 관해서 설명하고, 3절에서는 전체적인 특징형상 설계 시스템에 관하여 설명한다. 4절에서는 파라메트릭 설계 기법을 특징형상에 적용시키는 방법에 관하여 설명하고 5절에서는 시스템 구현 및 결과를 보이고 6절에서는 결론 및 후속 연구과제에 대하여 언급한다.

2. 기존 연구 결과

2.1 특징형상 디자인

솔리드 모델은 하위 형상 정보로 표현되어 CAM, 공정계획(process planning), 그리고 다른 응용분야에 직접적으로 이용될 수 없다. 따라서, 이러한 문제점을 해결하기 위해서 특징형상인식 과정을 거친다^{13,17)}. 그러나, 대부분의 특징형상 인식방법은 간단한 특징형상 인식에만 국한되었고 특징형상들간의 간섭이 발생할 경우에는 인식이 어려우며 디자인 단계에서 부여된 정보를 잃어버리게 된다.

반면에, 특징형상 모델링 접근방법에서는 특징형상들을 응용분야에 맞도록 정의할 수 있으며 이로부터 치수, 위치 그리고 여러 가지 속성값을 부여하여 설계에 이용할 수 있다. 이러한 접근방법은 다음 두 가지의 특성을 가지고 있다: 1)최대한 디자인 의도를 표현할 수 있으며 2)다른 응용분야로의 특징형상 매핑과정이 쉬워진다, 즉, 홈이나 슬롯과 같은 디자인 형상은 가공형상과 일치하기 때문에 별다른 변환과정을 필요로 하지 않는다.

특징형상 모델링에 관한 초기 연구로는 가공특징형상만으로 설계하는 방법(destructive feature modeling)이 있는데, 이 방법에서는 디자인과 공정계획이 동시에 이루어지도록 기본형상으로부터 가공형상들을 감하여 형상을 설계한다. 여기에 관한 대표적인 예는 QTC를 들 수 있다^{14,2)}. 그런데, 이 방법은 단지 가공형상만을 이용할 수 있어서 사용자에게 많은 제약을 부과한다. 뿐만 아니라, 설계자가 공정계획까지도 고려해야하는 단점이 있다. 그래서, 침하(depression) 특징형상 뿐만 아니라 돌출(protrusion) 특징형상으로 디자인을 가능케 한 연구로는 ASU feature testbed와 FMST를 예로 들 수 있다^{15, 4, 18)}. ASU Testbed는 두 가지 셸(shell)로 구성되어 있다(feature definition shell과 feature mapping shell). 프레임(frame)에 근거를 둔 데이터 구조와 CSG 트리가 특징형상을 정의

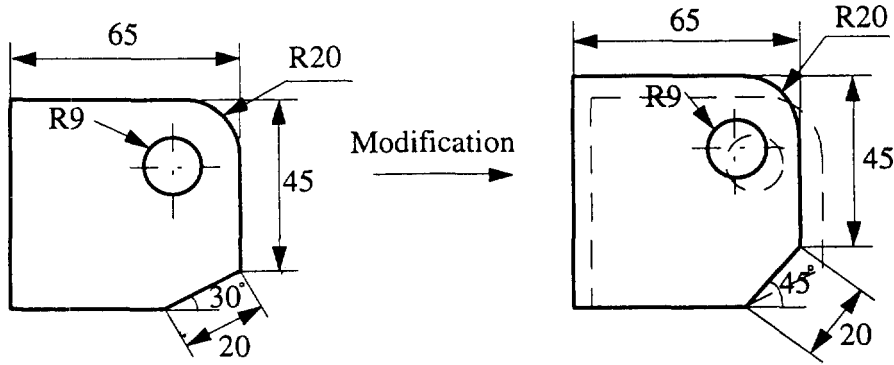


Fig. 1. An example of 2D parametric design.

하는데 이용된다. 그리고, 공차(tolerance) 정보는 정밀도(precision) 특징형상으로 정의된다. 특징형상들 사이의 치수적 관계는 여전히 공간벡터(x, y, z, α, β , 그리고 γ)로 정의되었다. 그러나, 이러한 관계는 디자인 측면과 사용자 인터페이스와는 거리가 멀다. Sheu와 Lin^[5]은 특징형상을 정의하고 운용하는 표현 방법론(representation scheme)을 제시하였다. Laakka와 Mäntylä^[19, 20]는 순차적인 특징형상 디자인에 관한 연구를 보여주었다. 특히 이 연구는 디자인이 진행되는 동안 특징형상을 추출해서 특징형상 디자인과 인식을 동시에 수행하였다. 그렇지만, 이들의 연구는 특징형상인식과정이 여전히 그래프 매칭에 의해 진행되어 특징형상들간의 간섭이 있을 경우는 가공형상인식이 힘들며^[21], 돌출 특징형상을 처리할 수 없는 단점이 있다. 위에서 살펴본 바와 같이 대부분의 연구 결과는 주로 생산자의 입장에서의 특징형상 표현방법에 관한 연구들이며 1)디자인 방법론, 2)새로운 특징형상 디자인의 정의 및 디자인의 용이성, 그리고 3)형상수정의 용이성 등을 고려한 연구는 거의 없다.

2.2 파라메트릭 디자인

파라메트릭 디자인은 사용자로 하여금 유연한 설계(flexible design)를 가능케 한다. 따라서 이 기법을 이용하여 정의된 형상은 치수의 변화에 따라 새로운 형상으로 쉽게 자동적으로 변화될 수 있다. 즉, 우선 사용자는 1)개념적인 외부형상을 스케치하며, 2)구속조건을 부여한 후, 3)구속조건과 관련된 특정한 치수값을 변경하여 원하는 형상을 얻는다. Fig. 1에서는 간단한 2D 파라메트릭 디자인 예를 보여준다. 일반적으로 많이 사용되는 파라메트릭 디자인에는 크게 두 가지 접근방법, 즉 1)수치적 접근방법(numerical approach), 2)지식기반 접근방법(knowledge-based ap-

proach) 접근방법이 있다. 수치적 접근방법^[7, 8]은 형상 구속조건을 방정식의 형태로 나타내고 이 연립방정식의 해를 구함으로써 형상을 정의하는 방법이다. 해를 구하기 위하여 수치해석적 방법을 사용하기 때문에 초기에 개략적으로 설계한 형상모델이 최종설계형상모델과 근사하지 않거나 또는 해를 찾는 과정에서 수치적 오차가 누적되어서 구속조건을 만족하는 해를 구할 수 없는 경우도 발생한다. 반면에, 지식기반 접근방법은 규칙(rule)과 그에 따른 추론(inferencing)에 근거를 두어 형상을 기호적 의미로서 규칙의 적용에 따라 단계적으로 형성해가는 방법이다^[9, 12]. 이 방법에서는 복잡한 구속조건을 (예, 접촉관계나 평형관계) 쉽게 표현할 수 있을 뿐만 아니라, 수치적인 방법이 아니라 심볼릭한 방법을 이용하여 수치 에러에 따른 시스템의 불안정이나 수치 에러의 축적과 같은 문제점을 없앨 수 있다. 그러나, 추론과정에서 많은 시간을 필요로 하여 대화적이고 지식기반 CAD 시스템에 바로 적용할 수 없는 단점이 있다. 예를 들면, 단지 20-30개의 형상요소로 구성된 디자인의 파라메트릭 모델을 위한 디자인 히스토리(construction plan)를 형성하는데 수분씩 걸린다^[9]. 만약 형상요소의 수가 증가했을 경우 추론시간은 기하급수적으로 늘어나게 된다. 비록 몇몇 연구결과에 따라 이러한 문제점이 향상되었으나, 여전히 이 문제 해결이 지식 접근방법의 주된 관점사 중의 하나이다. 그러나 쉽게 지식기반 CAD로 확장될 수 있는 장점이 있다. 따라서, 본 연구에서는 지식기반 접근방법의 장점을 최대한 살리고 이 방법론의 단점인 추론시간을 크게 줄일 수 있도록 그래프를 이용한 추론 방법을 사용한다.

3. 시스템 전체구조

특징형상과 파라메트릭 디자인을 결합하기 위해서

1)전체적으로는 최종 디자인 모델을 연속적인 특징형상의 집합으로 표현하고, 2)개별적으로는 특징형상을 구속조건에 의해서 상대적으로 위치시키고 정의한다. 특징형상 모델 정보는 CSG와 B-rep 모델에 분리되어 저장되어 있다. CSG 모델은 기존의 솔리드 모델과 독립적이며, 각 특징형상 정보, 구속조건, 그리고 파라메트릭 정보를 저장하고 있으며, 반면에 B-rep 모델은 ACIS 솔리드 모델러에 의한 최종적인 솔리드 형상정보를 저장하고 있다. 특징형상 설계 시스템의 전체적인 구성도는 Fig. 2에 도시되어 있다. 사용자는 특징형상을 설계하기 위해서 GUI를 통해 특징형상 모델(feature-based model)과 파라메트릭 모델(parametric design model)을 생성한다. 설계과정은 우선 특징형상 단면을 개략적으로 스케치하고 구속조건을 부여한 후 추론과정을 거쳐서 파라메트릭하게 특징형상 단면을 정의한다. 특징형상이 완전히 정의되면 스위핑 과정을 거쳐서 새로운 B-rep 솔리드형상을 만들어낸다. 솔리드형상 표현을 위해서 ACIS 모델러가 기하학적 형상 커널(geometric modeling kernel) 기능을 담당하고 있다. 이때, 특징형상인식 과정 및 디자인의 효율성을 위해서 각 B-rep모델의 면에는 각 특징형상 ID 등 여러 속성값이 저장되어 있다.

특징형상은 크게 3가지 종류로 분류되어 있다; 1)

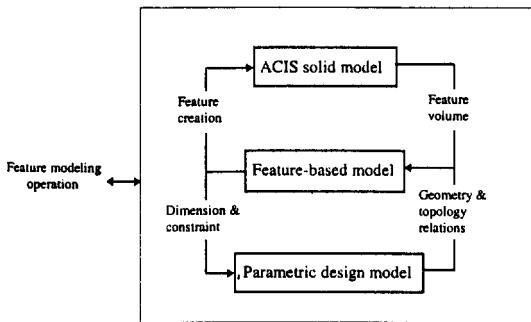


Fig 2. Overall structure of the proposed feature-based parametric design system.

주 특징형상(primary feature), 2)변이 (transition) 특징형상, 3)데이텀 특징형상(datum features). 주 특징형상에는 다시 translational 특징형상과 rotational 특징형상이 있으며, 변이 특징형상에는 라운딩(rounding)과 챔퍼링(chamfering)이 있고, 데이텀 특징형상은 주 특징형상을 정의하는데 이용되며 대표적으로 데이텀 평면(datum plane)이 있다. 특히, 주 특징형상은 단면 프로파일(profile)에 기초를 두고 단면이 스위핑에 의해 정의될 수 있는 형상이다. 프로파일 P는 스케칭 면에 정의된다. 스케칭 면은 이미 디자인된 특징형상 단면이나 데이텀 평면이 될 수 있다. 특히, 주 특징형상인 경우에 단면 P는 폐곡선(closed profile)을 이루어야 한다. P는 파라메트릭 디자인에 의해서 정의되는데 이때 구속조건은 P의 외부형상 뿐만 아니라 다른 특징형상과의 상대적인 위치도 결정한다.

4. 파라메트릭 특징형상 모델

특징형상을 이용하여 형상을 디자인하는 과정은 Fig. 3에서 볼 수 있듯이 1)스케칭, 2)구속조건 부여(constraining), 3)구속조건 해결(constraint solving), 4)스위핑, 5)특징형상들간의 블리언 오퍼레이션에 따라 진행된다. 우선 사용자는 특징형상의 단면을 개략적으로 스케치하여 특징형상의 토폴로지를 정의한다. 스케치 과정에서 시스템은 형상요소들간의 기하 및 위상학적인 관계를 predicate 심볼로 저장한다. 그리고 거리, 각도 등의 구속조건을 부여한다. 시스템에서는 입력된 predicate 심볼을 추론하여 형상의 디자인 히스토리(construction plan)를 완성한다. 사용된 구속조건 해결 방법은 그래프 표현법을 이용한 지식 접근 방식을 따른다^[22]. 파라메트릭 특징형상단면이 완성되면 스위핑 되어 B-rep 모델이 정의된다. 새로운 특징형상의 추가는 이미 디자인된 특징형상의 단면에 디자인되어 블리언과정이 진행되는데 이들간의 상대관계도 또한 구속조건 부여 및 구속조건 해결에 따른

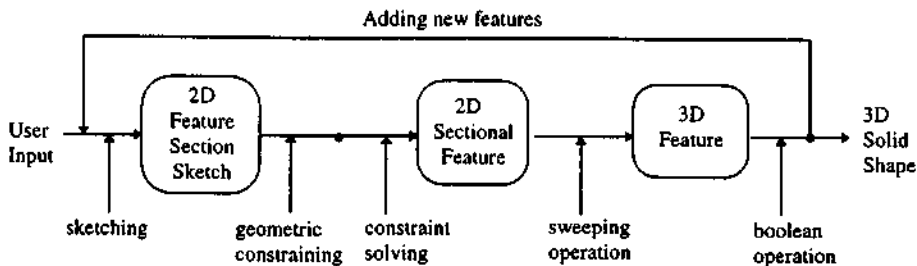


Fig. 3. Feature adding process.

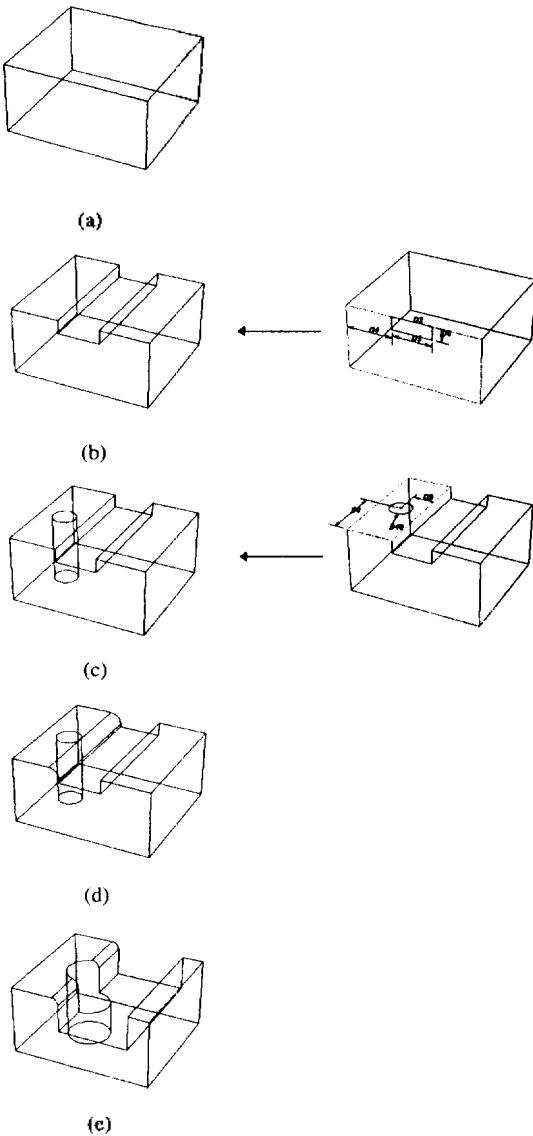


Fig. 4. Feature-based designing; (a) block, (b) slot, (c) hole, (d) round, and (e) modified shape.

디자인 히스토리 생성에 의해 이루어진다. Fig. 4에서는 파라메트릭 디자인에 따른 특징형상 설계 과정을 보여주고 있다. Fig. 4a는 초기 설계형상이며 4b는 슬롯의 단면이 스케치된 후 스위핑되어 만들어진 형상이다. 유사하게 4c에서는 홀이 설계되었고 마지막으로 슬롯의 한 변이 라운딩된 형상은 4d에 도시되어 있다. Fig. 4e는 4d의 수정된 형상이다.

4.1 지식기반 접근방법에 따른 단면의 파라메트릭 설계

파라메트릭 디자인에서는 구속관계(constraining relation)에 의해서 모든 형상요소들이 정의된다. 즉, 거리, 각도와 같은 외재적 구속조건과 접촉관계(tangency), 수직관계(perpendicularity), 그리고 평행관계(parallelism)와 같은 내재적 구속조건들이 형상요소들 간의 관계를 결정짓는다. 본 연구에서 사용되는 형상요소는 점, 선, 선분, 원, 호 등이 있다. 그리고 아래와 같은 구속조건들이 지원된다.

- 1) 외재적 구속조건: 거리, 각도, 반지름
- 2) 내재적 구속조건: 평행관계, 수직관계, 접촉관계, 일치관계(coincident), 중심일치관계(concentric), 대칭관계(symmetric)

그런데 지식기반 접근방법의 구속관계는 크게 세 부분으로 나누어져 있다. 형상요소들 간의 관계를 나타내는 predicate 영역(R), 점, 라인, 원, 호 등을 나타내는 상수영역(E), 그리고 치수값이나 속성을 나타내는 심벌 영역(D)으로 구성되어 있다. 즉, 구속형태는 주로 두 가지 형태로 표현된다.

$(R e_1 \dots e_n)$ 또는 $(R e_1 e_2 \dots e_n d)$ $R \in R, e_i \in E$ 그리고 $d \in D$

다음은 구속관계의 예를 나타낸다.

- Coordinate $P_1(x_n, y_n)$: 좌표 P_1 의 좌표값은 (x_n, y_n)
- Center $C P$: 원 또는 호의 중심좌표는 P
- Distance $P_1, P_2 d$: 두 좌표 P_1, P_2 간의 거리는 d
- Angle $T_1, T_2 a$: 두 직선간의 각도는 a
- Tangent $L C *$: L 과 C 의 접선관계
- Parallel $L_1, L_2 *$: 두 직선 L_1 과 L_2 의 평행관계

마지막 예제에서, Parallel은 predicate 심볼이고, L_1 과 L_2 는 형상요소들이며, *은 same-direction 또는 anti-direction과 같은 속성값을 나타낸다. 이러한 속성값은 사용자가 정의한 구속조건들로부터 야기되는 여러 가지 해 중에서 올바른 해를 선택하는데 이용된다. 구속조건들의 모임이 규칙(rule)을 구성하게 된다. 규칙은 조건부(condition)와 결론부(conclusion)로 구성되어 있으며 규칙기반(rule base)에 저장되어 있다. Fig. 5에서는 이러한 형상요소와 그에 따른 규칙을 보여주고 있다. Fig. 5(a)에서는 한 직선(L_1)의 식을 알고 다른 직선(L_2)까지의 거리를 알게되면 L_2 의 식도 알 수 있다는 의미이다. 그리고 Fig. 5(c)에서는 직선 선분(L)에서 직선의 기울기와 한 점(P_1)의 좌표값을 알고 두 점 사이의 거리를 알게되면 새로운 점(P_2)의 좌표값을 알게 된다. 이러한 규칙들을 사용하여 특징형상을 결정하게 되는데 이 과정에 관련된 일련의 규칙들을 디자인 히스토리라고 하고 후론

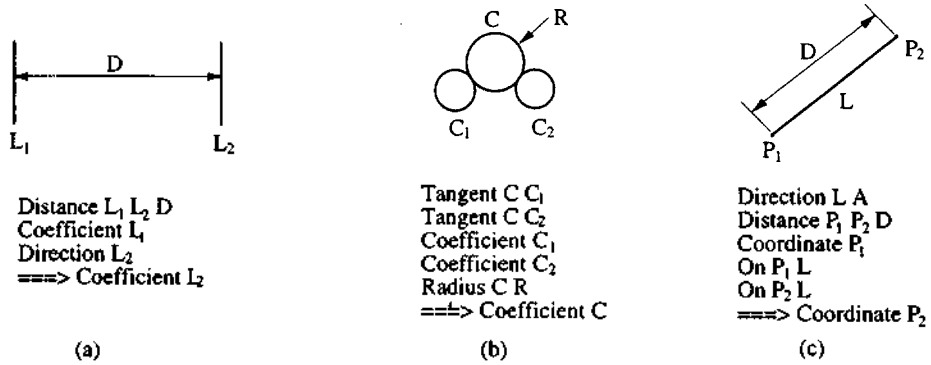


Fig. 5. Rule examples.

과정을 통하여 생성된다^{8, 23)}.

그러나, 앞에서 설명한 바와 같이 기존의 지식기반 접근방법은 추론시간이 많이 걸려서 대화적이고 지식기반 CAD 시스템에 직접 사용되기는 어렵다. 이를 해결하기 위해서 그래프 표현방법을 지식기반 접근방법에 접목한 방법을 개발하였다²²⁾. 우선 디자인 모델은 구속조건 그래프(constraint graph)로 표현이 된다. 각 노드는 형상요소를 나타내며, 각 아크는 형상요소들간의 관계를 표현한다. 추론과정은 이렇게 나타내진 구속조건 그래프를 바탕으로 규칙기반에서 적절한 규칙을 찾아서 새로운 사실(facts)을 생성시킴으로써 설계형상의 모든 기하학적 요소들을 확정시켜 나가는 과정이다. Fig. 6에서는 그래프를 이용한 추론과정을 전체적으로 보여주고 있다.

Fig. 6a의 형상을 정의하기 위하여 구속조건을 부여하면 Fig. 6b의 사실들이 생성된다. 이들을 구속조건 그래프로 나타내면 Fig. 6c와 같다. 이 그래프로부터 새로운 사실을 생성시킬 수 있는 적절한 서브그래프(subgraph)를 찾고, 이 서브그래프에 주어진 정보로부터 새로운 사실을 생성시킬 수 있는 규칙을 찾는 일련의 과정을 Fig. 6d가 보여주고 있다(자세한 내용은²²⁾ 참조). Fig. 6d의 (1)은 P_0 의 위치를 알고, P_0 가 L_0 상에 있고, L_0 의 방향벡터(direction vector)를 알고 있음을 나타내는 그래프이다. 적절한 규칙기반이 구축되어 있다면 이 서브그래프에 주어진 정보로부터 해당되는 규칙을 추론하여 새로운 사실, 곧 L_0 의 계수(coefficient)를 알 수 있게되며, 이로부터 기하학적 구성요소 L_0 가 확정된다. 이러한 과정을 반복함으로써 Fig. 6a의 모든 기하학적 요소를 결정할 수 있게 된다. 매개변수 값의 변경에 의해 형상수정 과정은 다시 추론 과정을 거칠 필요가 없이 생성된 디자인 히스토리에 포함되어 있는 일련의 규칙들을 따

라서 기하학적 요소들의 위치를 다시 계산함으로써 간단하게 이루어진다.

추론은 다음의 두가지 방법에 의해 진행된다; 1) one-to-one graph inference (OOGI)와 2)two-to-one graph inference (TOGI). 두 방법은 주어진 구속조건으로부터 선택적으로 형상요소들을 추론한다. 모든 형상요소가 추론되거나 더 이상 추론이 이루어지지 않을 때까지 OOGI와 TOGI 과정은 번갈아가면서 실행된다. OOGI는 타입1 규칙 그래프를 추론하는데 이용되고, TOGI는 타입2 규칙 그래프를 추론하는데 이용된다. 타입1 규칙 그래프는 두 개의 노드와 하나의 아크로 구성된 서브그래프다 (예, Fig. 6d의 (1), (2), 그리고 (3)). 특히, 하나의 노드는 well-constrained된 노드다. 반면에, 타입2 규칙 그래프는 3개의 노드와 2개 또는 3개의 아크로 이루어진 서브그래프다 (예, Fig. 6d의 (4), (5), 그리고 (6)). 타입2 그래프에서 두 개의 노드는 well-constrained된 노드이고 하나는 under-constrained된 노드다.

추론을 신속히 진행시키기 위해서 각 타입의 규칙에는 키(key)가 부여되어 있다(Fig. 6d(1)에서 LpO). 규칙 키는 형상요소들과 그들간의 관계를 나타내는 문자로 구성되어 있다. 첫 번째 문자는 추론되어야 할 형상요소를 나타낸다. 다른 문자는 이웃 형상요소와 구속관계를 나타낸다. 소문자는 well-constrained된 노드를 나타내고, 대문자는 under-constrained되거나 semi-defined된 노드를 나타낸다. 예를 들면 Fig. 6d(1)은 타입1 규칙 그래프로서 'L'은 추론되어야 할 라인 L_0 이고 'p'는 well-constrained된 점 P_0 이며 'O'는 predicate On을 나타낸다. 규칙 그래프와 규칙 키에 바탕을 둔 OOGI 과정은 아래와 같다.

Step 1: 구속그래프로부터 타입1 규칙 그래프와 일치

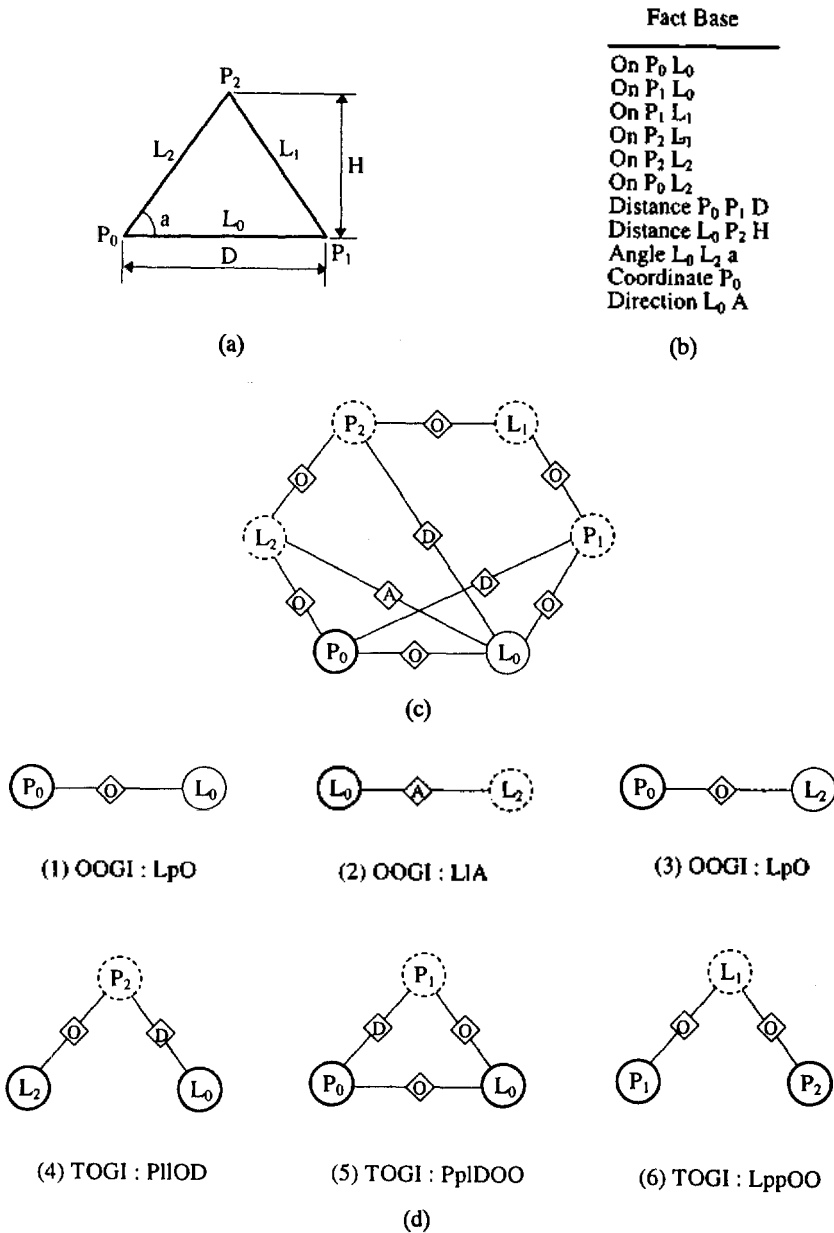


Fig. 6. An inference example; (a) a triangle design, (b) associated facts, (c) a constraint graph, and (d) constraint sub-graphs in inference process.

하는 형태의 서브그래프들을 찾는다.

Step 2: 각 서브그래프마다 규칙 키를 부여한 다음 키 값이 일치하는 타입1 규칙 그래프를 찾은 후 추론과정을 거친다.

Step 3: 만약 성공적으로 추론이 이루어진 경우는 구속그래프와 디자인 히스토리를 수정한 후 더 이상 추론을 할 수 없을때까지 위의 과정을 반복한다.

TOGI 과정은 OOGI 과정과 유사하며 타입2 규칙 그래프를 추론하는데 이용된다.

4.2 파라메트릭 특징형상 모델링

복잡한 형상을 모델링하기 위해서는 특징형상을 하나씩 추가해야한다. 특히, 이러한 단계에서는 특징형상들간의 관계 유지가 무엇보다도 중요하며 이 또

한 파라메트릭 디자인에 의해서 유지된다. 특징형상을 추가하는 과정에서 이루어지는 파라메트릭 모델링 기법은 1)차수내림과정(degree reduction), 2)특징형상간의 관계추론 등이 필요하다.

4.2.1 차수내림 과정

차수내림과정은 3차원 정보를 2차원 정보로 변환하는 과정인데 특히 2차원 정보의 z 축이 선택된 면에 수직이 되도록 변환한다. Fig. 7(a, b)에서 볼 수 있듯이 선택된 법선벡터가 z축 방향으로 향하게 되어 화면에서 밖으로 나오는 방향이 z축으로 정의되어 새로운 특징형상에 대한 지역좌표계(local coordinate frame)가 정의된다. 지역좌표계 상에서 모든 형상요소의 z값은 같게 되어 모든 디자인 과정이 2D 설계와 유사하게 이루어진다. 선택된 스케칭 면의 법선벡터가 z축방향으로 변환되는 과정은 xyz변환과정을 거친다.

Fig. 7(a)에서 (b)로의 변환 행렬을 T^r 로 가정하고 (b)에서 다시 (a)로의 변환행렬을 T^c 이라고 가정한다. T^c 은 새로운 특징형상의 변환행렬로 특징형상 내부에 저장된다. 지역 좌표계에서 정의된 형상은 T^c 에 의해 차수올림(degree elevation) 과정을 거쳐 2D에서 3D로 변환되어 원좌표계(world coordinate frame)

상에서 정의된다. 그리고, Fig. 7(c)에서 볼 수 있듯이 사용자가 3차원 상에서 직접 스케치를 할 수도 있다. 이때에도 위와 유사한 과정을 거친다.

4.2.2 특징형상들간의 관계추론

특징형상들간의 파라메트릭 관계는 두 형상들간의 관계를 나타내는 특징형상간의 구속조건을 부여하여 새로운 사실과 구속조건들을 생성하고 이들을 바탕으로 관련된 규칙을 추론함으로써 결정된다. 형상간 구속조건은 추가될 특징형상의 상대적인 위치를 정의하는 치수(거리 또는 각도)로서 항상 두개의 형상요소 사이에 정의된다. 그런데, 두개의 형상요소는 각각 다른 특징형상에 소속되어 있다. 예를 들면, Fig. 8(a)에서 D_0 와 D_1 이 형상간 구속조건들이며 이들에 의해서 F_1 의 중심 좌표의 위치가 지정된다. D_0 는 L_1 과 C 의 거리인데 특징형상 볼륨이 형성된 후에는 면과 중심축(principal axis)과의 거리를 나타낸다. Fig. 8(b)에서는 D_0 와 D_1 이 형상간 구속조건에 해당되며 포켓의 상대적 위치를 나타낸다.

Fig. 8(a)에서 새로운 특징형상 홀 F_1 가 정의되기 위해서는 우선 형상간 구속조건 D_0 와 D_1 에 의해서 중심이 정의되어야 하고 R에 의해서 크기가 정의되어야 한다. 또, D_0 와 관련하여 Direction L_1 , A,와

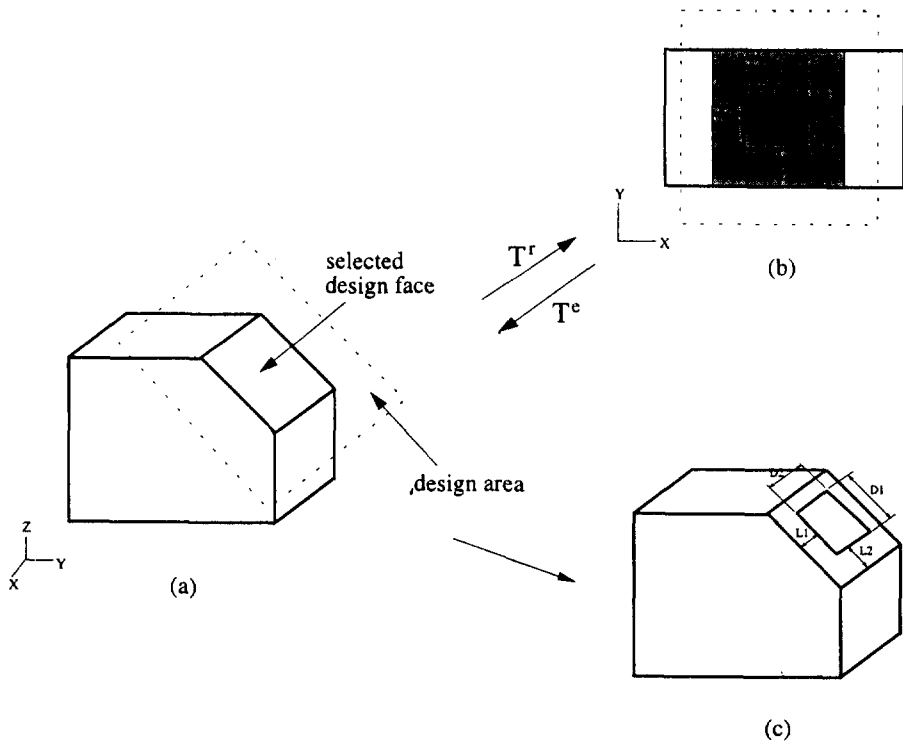


Fig. 7. Transformation for designing features.

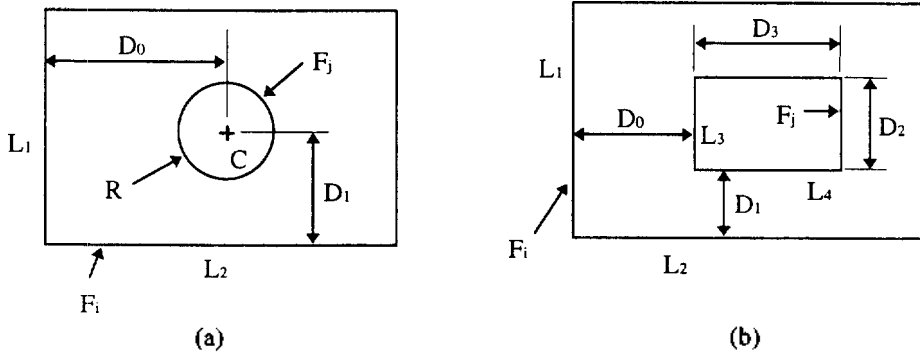


Fig. 8. Relative position of features.

Coefficient L_1 를, 그리고 D_1 과 관련하여 Direction L_2 , A_2 와 Coefficient L_2 를 새로 정의되는 특징형상 F_j 의 사실기반(factbase)에 추가해야한다. 그런 후, 추론과정을 통하여 아래의 추론된 규칙에 의해 F_j 가 정의된다.

- Distance L_1 C D_1 ,
- Distance L_2 C D_1 ,
- Coefficient L_1 ,
- Coefficient L_2
- ====> Coordinate C

Fig. 8(b)에서도 같은 방법으로 Direction L_1 , A_1 과 Coefficient L_1 , Direction L_2 , A_2 와 Coefficient L_2 등이 사실기반에 생성되며 추론과정을 통하여 아래와 같은 규칙에 의해 L_3 , L_4 등의 형상요소가 정의된다.

- Coefficient L_1 ,
- Distance L_1 L_3 D_1 ,
- ====> Coefficient L_3

4.3 특징형상 수정

특징형상 F_i 수정에 따른 최종형상은 우선 F_i 에서 F_n 까지 디자인된 형상으로 되돌아가서 F_i 에서 F_n 까지를 차례로 다시 디자인함으로써 생성된다. 그러나, 이러한 과정이 쉽게 이루어지지는 않는다. Fig. 9는 슬롯이 디자인된 후 라운딩을 슬롯의 한 변에 수행한 최종형상(P)과 이 슬롯을 수정하였을 경우 수정된 형상(P')을 보여준다. 사실 P'은 사용자가 의도한 형상이 아니며 O가 최종형상이 되어야 한다. 따라서 근본적인 문제는 파라메트릭 디자인에 따라 형상수정을 수행할 때 구속조건에 의해서 정의된 형상요소를 어떻게 정확하게 찾아내느냐에 달려있다. 만약 단순히 포인터를 사용할 경우에는 이러한 일관성을 유지하

기 힘들다. 즉, 형상수정에 따라 토폴로지가 변하기 때문에 포인터를 사용할 수 없다. 따라서 이러한 일관성을 유지하기 위해서는 특징형상들간의 간섭에 의해서 생성되거나 분리된 형상요소들의 정확한 토폴로지 명명법(topological naming)이 필요하다^[24].

형상요소 명명에는 면 명명법(face naming), 모서리 명명법(edge naming), 그리고 꼭지점 명명법(vertex naming) 등이 있다. 면 명명법에서는 면의 분리(splitting)와 합병(merging)에 따라 변화가 생기더라도 정확한 면을 알아낼 수 있어야하며 모서리와 꼭지점 명명법에서도 마찬가지다. 이러한 명명법은 설계단계에서 사용자가 입력한 구속조건을 특징형상 모델과 B-rep 모델 상호간의 올바른 매칭을 하는데 사용된다.

Fig. 10과 Fig. 11는 특징형상 수정에 따른 토폴로지 변화에 따른 각 형상 요소의 매핑과정을 보여준다. Fig. 10에서는 홀의 위치의 변화에 따른 라운딩의 매핑과정을 보여준다. 즉, 라운딩할 모서리가 분할되어서 결과적으로 두 개의 모서리가 라운딩되었다. Fig. 11에서는 모서리가 합병된 애저에서의 라운딩 과정을 보여준다. 특징형상의 위치가 변하여 면들이 합병되었고 그에 따라 모서리도 합병된 상태다. 그렇지만 각 형상요소들의 명명 과정이 앞에서 설명한 것처럼 잘 이루어졌기 때문에 라운딩을 수행하는데 어려움이 없다.

4.4 EFAGraph

디자인된 형상의 유효성과 형상수정 등을 수행하기 위해서는 특징형상들간 관계의 유지가 중요하다. 이런 관계는 EFAGraph (Extended Feature Adjacency Graph)에 의해서 이루어진다. EFAGraph는 트리로 구성되어 있으며 각 노드는 특징형상을 표현하며 각 아크는 PCR(parent-child relationship)이나 FIR(feature interaction relationship)을 나타낸다. Fig.

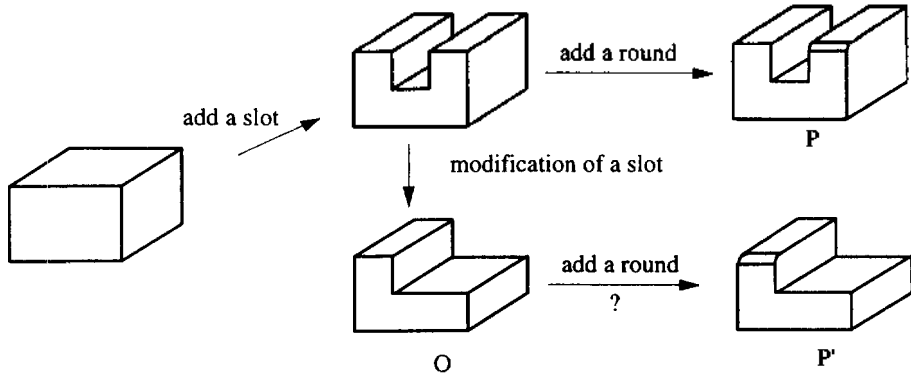
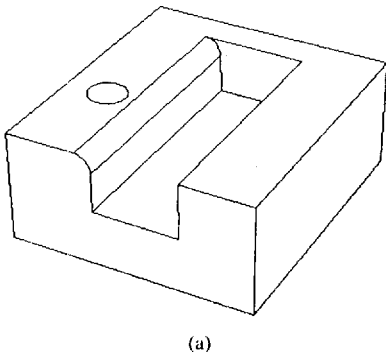
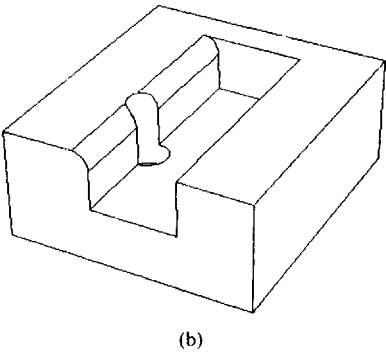


Fig. 9. Design modification.



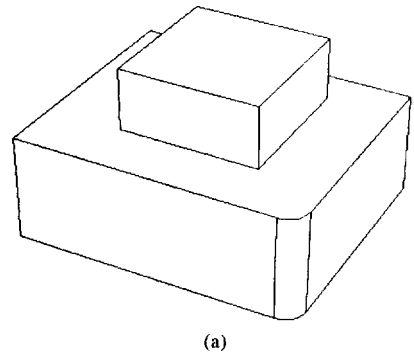
(a)



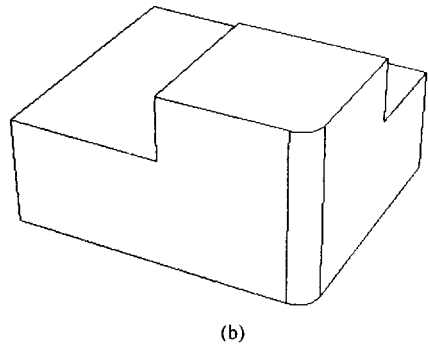
(b)

Fig. 10. Feature modification example 1; edge splitting.

12에서는 디자인된 형상과 그에 따른 EFAGraph를 보여주고 있다. 실선 아크와 점선 아크는 각각 PCR과 FIR을 나타낸다. 일반적으로 PCR은 디자인 과정에서 새로운 특징형상이 기존의 특징형상 면위에 디자인될 경우에 생성된다. 즉, F_i 가 F_j 위에 상대적으로 정의되었을 경우에 PCR이 생성된다. FIR가 일어나는 경우에는 다음 두 경우가 있다;



(a)



(b)

Fig. 11. Feature modification example 2; edge merging.

- 1) $\Delta F_i \cap * \Delta F_j \neq \emptyset$.
- 2) $\Delta F_i \cap * \Delta F_j = \emptyset \& F_i \cap \partial F_j \neq \emptyset$.

여기서 ΔF_i 는 F_i 의 볼륨, F_i 는 F_i 의 boundary set, \cap^* 는 regularized boolean intersection 임.

위의 두 관계는 디자인과정과 생산과정에서 유용하게 이용된다. PCR은 디자인과정에서 특징형상의

수정 및 삭제에 이용된다. F_i 와 F_j 가 PCR이 있는 경우 F_i 가 수정되면 F_j 도 또한 수정과정을 거친다. 그리고 만약 F_i 가 삭제될 경우에도 EFAGraph에 의해서 모든 자식 형상들도 함께 삭제되거나 사용자가 다시 정의할 수 있도록 알려준다. Fig. 13에서 볼 수 있듯이 만약 사용자가 F_i 를 삭제하려고 할 경우 Fig. 13(b)에서처럼 자식 형상인 F_2 은 삭제되지 아니하면 Fig. 13(c)에서처럼 새롭게 다른 특징형상을 기준으로 정의되고 위치하여야 한다.

FIR은 가공에 있어서 특징형상들간의 합병 및 분

할에 이용된다. 합병은 다수의 특징형상을 새로운 하나의 복잡한 형상으로 변환하며, 분할은 하나의 형상을 둘 이상의 새로운 형상으로 변환하는 것을 의미한다. 합병과 분할의 주된 목적은 가공공정을 최적화하는데 있다. 예를 들면, Fig. 12(a)에서, slot-2와 slot-3은 FIR을 가지고 있으며, 아래면(bottom face)이 병합되어 있다. 이러한 경우에 만약 한번의 가공이 각각을 달리 가공하는 것보다 경제적이면 둘은 하나의 포켓으로 새롭게 정의한다. 반면에, 드릴링과정을 요구하는 홀이 다른 형상과 FIR을 가지고

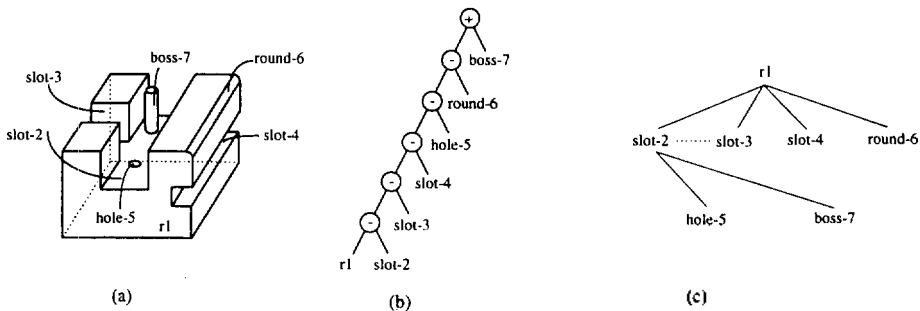


Fig. 12. EFAGraph; (a) a designed part, (b) CSG tree, and (c) EFAGraph.

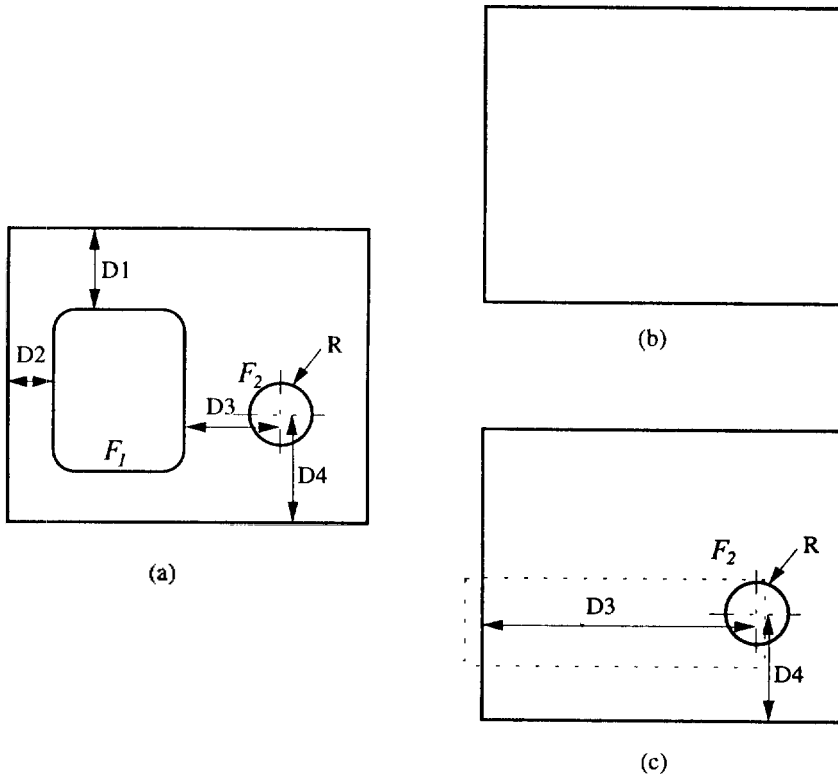
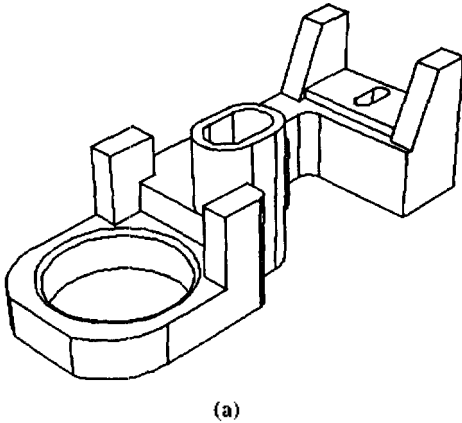
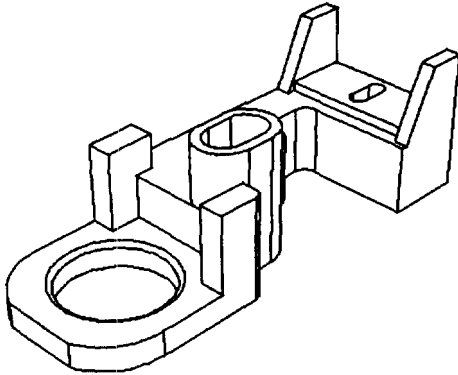


Fig. 13. Feature deletion.



(a)



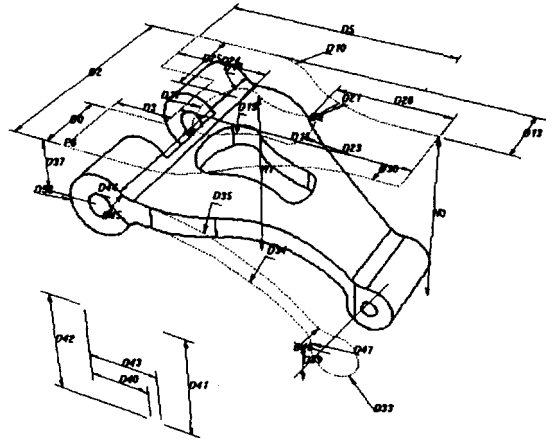
(b)

Fig. 14. MBB: Gehaeuse design and its modified shape.

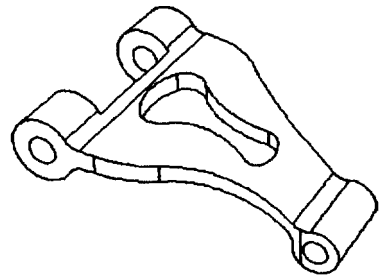
있으면서 분할되었을 때, 양쪽 끝에서 따로 가공하는 것이 좋을 경우에는 둘로 분할한다 (드릴링 깊이가 너무 깊어 한 번에 가공이 어려운 경우).

5. 시스템 구현 및 결과

제시된 파라메트릭 디자인에 의한 특징형상 디자인 시스템을 IRIS Indigo 워스테이션 상에서 C++로 구현하였다. 구현한 시스템을 이용하여 설계한 Fig. 14(a)은 CAD*I의 testpart인 Gehaeuse를 보여주는데 여기에는 6개의 돌출 특징형상과 1개의 라운딩이 포함되어 있으며 Fig. 14(b)는 Fig. 14(a)의 수정된 형상을 보여준다. 특히 디자인 특징형상의 수가 많을수록 수정작업은 단순한 치수값 변경에 의해서 가능하기 때문에 디자인 수정이 많이 요구되는 초기 디자인 과정에 아주 적합하다. Fig. 15는 힌지(hinge)와 수정된 형상을 보여주는데 이것은 두개의 특징형상 단면을 스윕핑한 후 블리언 인터섹션을 수행한 결과



(a)



(b)

Fig. 15. Hinge design and its modified shape.

이다.

디자인 뿐만 아니라 특징형상 모델링은 여러 분야에 적용이 가능하다. 특히 가공분야에 응용되기 위해서는 설계형상이 가공이나 공정계획에 필요한 형태로 변환되어야 한다. 대부분의 디자인 특징형상은 가공형상과 일치하기 때문에 일대일로 변환이 가능하다. 그러나, 돌출 특징형상과 같은 디자인 형상은 가공형상과 일치하지는 않는다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 일대일 변환이 되지 않는 설계 특징형상으로부터의 가공 특징형상을 추출하는 과정이 필요하다. 그렇지만, 이때의 형상인식은 단순한 CAD정보에서 인식하는 것과는 달리 디자인 과정에 관한 정보를 간직하고 있으므로, 다만 직접 가공형상으로 변환이 되지 않는 디자인 형상에 대해서만 형상인식을 수행하게 된다. 디자인이 끝난 상태가 아니라 진행과정에서 형상인식이 진행되어 사용자의 의도를 쉽게 파악할 수 있을 뿐만 아니라 추출과정을 단순화시키고 인식속도도 빠르게 할 수 있다. 또한, 인식된 가공형상을 표현할 수 있는 일

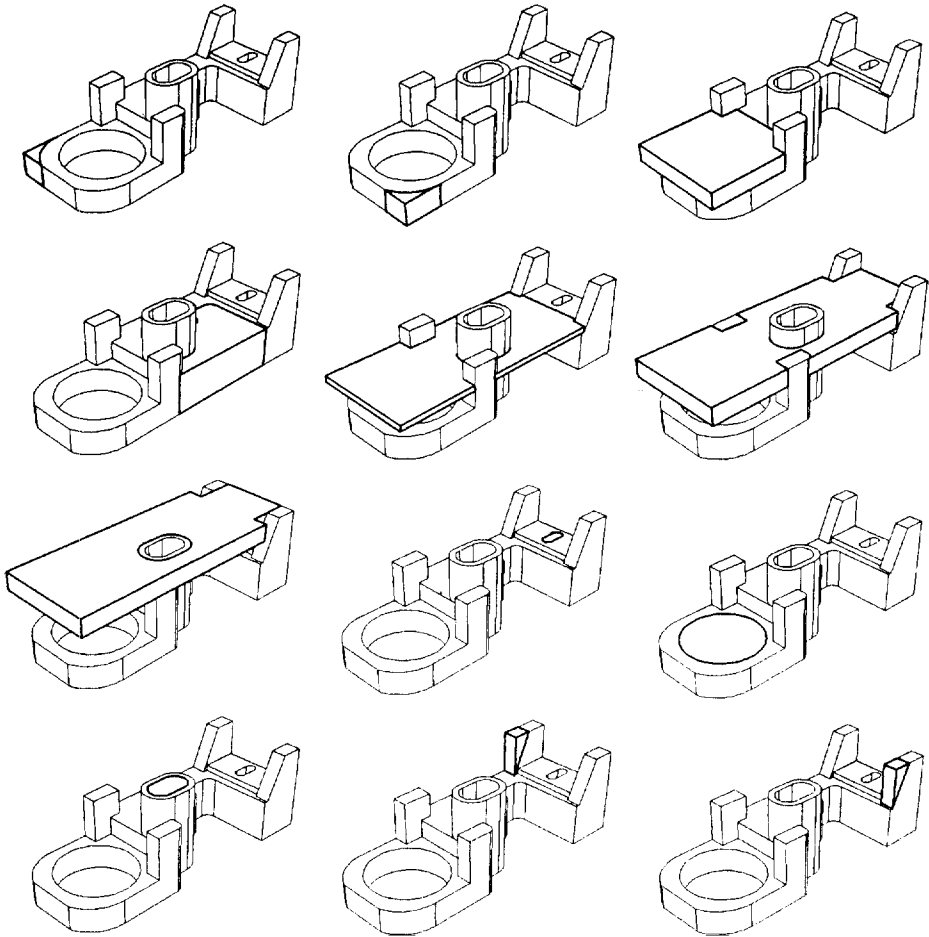


Fig. 16. Some of the extracted machining features for Gehaeuse.

관된 스키마(schema)가 필요하다. 본 연구에서는 이를 위해 PDES/STEP으로 표현가능한 MRSEVs^{25, 26)}를 가공형상 모델로 설정하였다. Fig. 16은 특징형상을 이용한 설계한 형상 모델 (Fig. 14)로부터 가공형상을 추출한 예를 보여주고 있으며 굵은선으로 표시된 형상이 가공특징형상이다²⁷⁾. 특히, 다양한 형태의 돌출 특징형상이 포함되어 있지만 효과적으로 이를 가공특징형상으로 변환시킬 수 있음을 보여주고 있다.

6. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 지식기반 접근방법에 따른 파라메트릭 특징형상 모델링 방법론을 제시하였다. 특히, 지식기반 접근방법론의 단점인 추론시간을 줄이기 위해서 그래프를 이용한 새로운 추론 방법론을 사용

하였다. 본 연구결과는 특징형상 정의 및 디자인 과정이 쉽고 형상수정이 쉽기 때문에 초기 디자인 과정에 적합하다. 스케칭, 구속조건 부여 및 디자인 히스토리 생성, 스위핑 과정을 거쳐 특징형상을 정의할 수 있어서 특징형상 디자인의 제약성을 극복할 수 있다. 뿐만 아니라, 특징형상 수정과정에서 자주 발생하는 토폴로지의 변화에 따른 형상의 변화에도 쉽게 대처할 수 있다.

추후연구 내용은 다음과 같다.

- 구속조건이 부족한 기하학적 형상의 파라메트릭 설계 (parametric design with under-constrained geometry): 사용자가 디자인 초기에 모든 구속조건을 부여하기보다는 가능한 구속조건만을 부여하고 나머지는 시스템이 임의의 구속조건을 부여해주고 필요시 구속조건을 추가로 부여하는 방법을 개발하고자 한다.

• 특징형상기반 설계모델로부터 가공특징형상 추출 (generating alternative interpretations of machining features from a feature-based design model): 특징형상 모델로부터 가공특징형상의 가능해(feasible solution) 하나를 얻은 후 이로부터 여러 해(alternative interpretation)를 생성할 수 있는 방법론 개발과 가공특징형상 및 그들간의 관계 표현방법에 관한 연구를 수행하고자 한다.

참고문헌

1. Chang, T. C., *Expert process planning for manufacturing*, Addison-Wesley Press, Massachusetts, 1990.
2. Turner, G. P., "An object-oriented approach to feature-based design," *MS Thesis*, Purdue Univ., 1988.
3. Shah, J. J. and Rogers, M. T., "Expert form feature modelling shell," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 20, No. 9, pp. 515-524, 1988.
4. Shah, J. J. and Mathew, A., "Experimental investigation of the STEP form-feature information model," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 23, No. 4, pp. 282-296, 1991.
5. Sheu, L. and Lin, J. T., "Representation scheme for defining and operating form features," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 25, No. 6, pp. 333-347, 1993.
6. Gossard, D. C., Zufante, R. P. and Sakurai, H., "Representing dimensions, tolerances, and features in MCAE systems," *IEEE Comput. Graph & Applic.*, Vol. 5, No. 3, pp. 51-59, 1988.
7. Hillyard, R. and Braid, I., "Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 10, No. 3, pp. 161-166, 1978.
8. Light, R., Lin, V. and Gossard D., "Variational geometry in CAD," *Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3, pp. 171-177, 1981.
9. Aldefeld, B., "Variation of geometries based on a geometric-reasoning method," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 20, No. 3, pp. 117-126, 1988.
10. Sunde, G., "Specification of shape by dimensions and other geometric constraints," IFIP WG. 5.2 on Geometric Modeling, Rensselaer, NY, 1986.
11. Verroust, A., Schonek, F., and Roller, D., "Rule-oriented method for parameterized computer-aided design," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 25, No. 10, pp. 531-540, 1993.
12. Suzuki, H., Ando, H., and Kimura, F., "Geometric constraints and reasoning for geometrical CAD systems," *Comput. & Graphics*, Vol. 14., No. 2, pp. 211-224, 1990.
13. Joshi, S. and Chang, T. C., "Graph-based heuristics for recognition of machined features from a 3-D solid model," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 20, No. 2, pp. 58-66, 1988.
14. Kyprianou, L., "Shape classification in computer aided design," *PhD Thesis*, University of Cambridge, UK, 1980.
15. Der-Baan P., Chen, Z. and Li R., "Automatic 3D machining feature extraction from 3D CSG solid input," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 22, No. 5, pp. 285-295, 1990.
16. Ferreira, J. C. E. and Hinduja, S., "Convex hull-based feature-recognition method for 2.5D components," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 22, No. 1, pp. 41-49, 1990.
17. Henderson, M. R., "Extraction of feature information from three-dimensional CAD data," *PhD Thesis*, Purdue Univ., USA, 1984.
18. Duan, W., Zhou, J. and Lai, K., "FMST: a feature solid-modelling tool for feature-based design and manufacture," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 25, No. 1, pp. 29-38, 1993.
19. Laakko, T. and Mäntylä, M., "A feature definition language for bridging solids and features," *Proceedings of ACM Solid modeling*, Montreal, Canada, pp. 333-342, 1993.
20. Laakko, T. and Mäntylä, M., "Feature modelling by incremental feature recognition," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 25, No. 8, pp. 479-492, 1993.
21. Tseng, Y. and Joshi, S. B., "Recognizing multiple interrepresentations of interacting machining features," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 26, No. 9, pp. 667-688, 1994.
22. Lee, J.Y. and Kim, K., "Geometric reasoning for knowledge-based parametric design using graph representation," *Comput.-Aided Des.*, Vol. 28, No. 9, pp. 831-841, 1996.
23. 이재열, "특징형상을 이용한 설계에 관한 연구," 석사학위논문, 포항공과대학교, 1994.
24. Kripac, J., "A mechanism for persistently naming topological entities in history-based parametric solid models," *Proceedings of ACM Solid modeling*, Utah, USA, pp. 21-30, 1995.
25. Kramer, T.R., "Issues concerning material removal shape element volumes(MRSEVs)," *Int. J. Comput. Integrated Manuf.*, Vol. 7, No. 7, pp.139-151, 1994.
26. Kramer, T. R., "A library of material removal shape element volumes(MRSEVs)," NISTIR 4809, NIST, Gaithersburg, Maryland, 1992.
27. 이재열, 김광수, "설계특징형상으로부터 가공특징형상의 추출," 한국정밀공학회, 추계학술대회, 한양대학교, pp. 737-742, 1995.



이재열

1992년 포항공과대학교 산업공학과 학사
1994년 포항공과대학교 산업공학과 석사
1994년 ~ 현재 포항공과대학교 산업공학과 박사과정

관심분야: Feature-based parametric design, Machining feature extraction, Geometric reasoning in intelligent



김광수

1977년 서울대학교 산업공학과 학사
1979년 서울대학교 산업공학과 석사
1985년 University of Central Florida 박사
1985년 ~ 1988년 Rochester Institute of Technology 조교수
1988년 ~ 현재 포항공과대학교 산업공학과 조교수/부교수

관심분야: Geometric modeling, Product modeling, Product data technology

Web: <http://cadcam.postech.ac.kr>