

사출 성형 제품의 설계 및 해석의 통합 환경을 제공하기 위한 특징 형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발

이상현* · 이건우**

Feature-Based Non-manifold Geometric Modeling System to Provide Integrated Environment for Design and Analysis of Injection Molding Products

Sang-Hun Lee* and Kunwoo Lee**

ABSTRACT

In order to reduce the trial-and-errors in design and production of injection molded plastic parts, there has been much research effort not only on CAE systems which simulate the injection molding process, but also on CAD systems which support initial design and re-design of plastic parts and their molds. The CAD systems and CAE systems have been developed independently with being built on different basis. That is, CAD systems manipulate the part shapes and the design features in a complete solid model, while CAE systems work on shell meshes generated on the abstract sheet model or medial surface of the part. Therefore, it is required to support the two types of geometric models and feature information in one environment to integrate CAD and CAE systems for accelerating the design speed.

A feature-based non-manifold geometric modeling system has been developed to provide an integrated environment for design and analysis of injection molding products. In this system, the geometric models for CAD and CAE systems are represented by a non-manifold boundary representation and they are merged into a single geometric model. The suitable form of geometric model for any application can be extracted from this model. In addition, the feature deletion and interaction problem of the feature-based design system has been solved clearly by introducing the non-manifold Boolean operation based on 'merge and selection' algorithm. The sheet modeling capabilities were also developed for easy modeling of thin plastic parts.

Key words : CAD, CAE, Injection molding, Geometric modeling, Non-manifold, Feature, Feature-based design, Feature mapping, Feature conversion, Sheet modeling

1. 연구배경

사출 성형은 분말 또는 알갱이 상태의 고분자 재료에 열을 가해 용융 시킨 후 압력을 가하여 금형 내부의 캐비티를 충전한 후 냉각시킴으로써 제품을 만드는 고분자 재료의 대표적인 가공 방법이다. 사출 성형의 설계에는 제품과 금형의 기하학적 형상을 결

정하고 제품의 성형 조건을 선택하는 과정이 포함되며, 각 설계 변수들의 상호 작용에 의해 최종 사출 성형 제품의 기계적 및 외형적 품질이 결정된다. 따라서 사출 성형 제품과 금형의 설계자는 생산 시 발생하는 문제점들을 미리 고려하여 설계를 해야 한다. 전통적인 사출 성형 제품의 설계는 다년간에 걸친 설계자의 경험을 바탕으로 이루어지며 제품 및 금형의 설계로부터 최종 제품의 생산에 이르기까지 오랜 기간의 시행 착오 과정을 필요로 한다. 이러한 과정은 제품의 제조 기간 및 원가를 상승시키는 원

*정회원, 국민대학교 자동차공학과

**중신회원, 서울대학교 기계설계학과

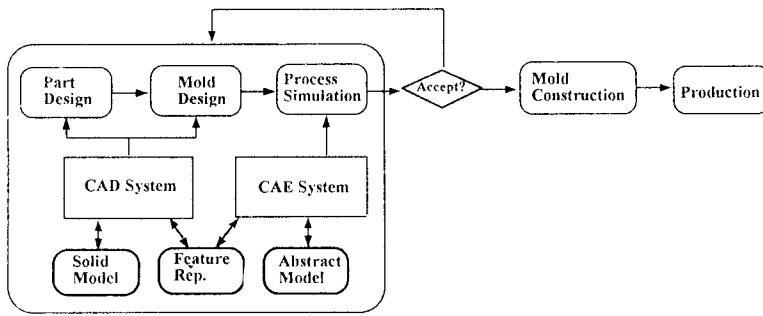


Fig. 1. Design process using traditional CAD and CAE systems for plastic injection molding product.

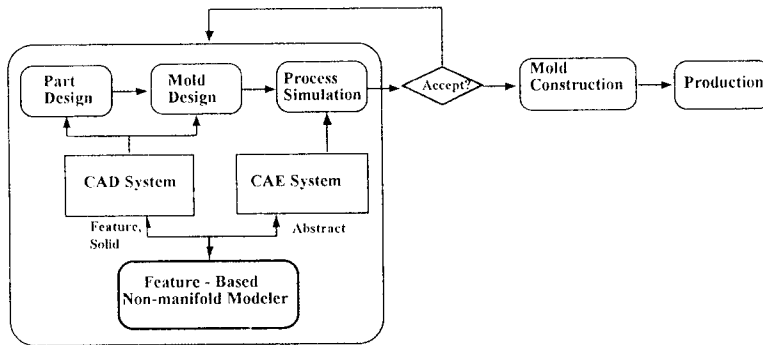


Fig. 2. Integration of CAD and CAE systems by introducing a unified geometric modeling system.

인으로 작용하므로 이를 줄이기 위한 여러 가지 시도가 행해졌다.

그 가운데 하나는 사출 제품 및 금형 설계 전용 CAD 시스템^(1,2,3,4,5)을 개발하여 설계 초기 단계에 도움을 주는 시스템을 구축하는 것이고, 또 다른 하나는 사출 과정을 컴퓨터상에서 미리 시뮬레이션함으로써 부품의 성형성, 기계적 결합 등을 제조 공정 이전에 발견하고 이에 대한 대책을 고려할 수 있도록 하는 것이다^(6,7,8,9). 전자의 경우가 합성과정에서의 지원 기능이라면, 후자의 경우는 해석을 통한 지원이라고 할 수 있으며, 이들은 재료의 물성 및 표준화된 금형 부품의 데이터베이스를 바탕으로 두고 있다. 이들을 이용한 개선된 설계 및 제조 과정은 Fig. 1에 나타난 바와 같이, 초기 설계 과정은 사출 제품 및 금형 설계 전용 CAD 시스템의 지원을 받고, 이 초기 설계에 대한 성능 및 결합을 사출 과정에 대한 해석을 통해 예측한 다음, 해석 결과가 받아들여 질 수 있는 수준에 이르기까지 재설계 과정을 반복 수행한 후, 금형 제작에 들어가는 과정으로 구성된다.

이때 초기 설계 과정에서 필요한 기하학적 모델은 리브, 보스와 같은 특징 형상의 표현을 포함하고 있는 솔리드 모델인 반면, 해석 과정에서 필요한 것

은 솔리드의 축약된 형태인 중립 면을 지나는 박판 모델로부터 만들어진 쉘 메쉬이다. 그런데 지금까지 개발된 시스템들은 그 시스템에서 원래 의도한 기하학적 모델에 한정시켜 독립적으로 관리하고 있기 때문에, 설계 시의 모델과 해석 시의 모델을 해당 시스템들을 사용하여 별도로 모델링해 주어야 하는 불편이 뒤따르게 된다. 따라서 만일 설계 합성과 해석에 사용되는 기하학적 모델들이 하나의 공통된 형상 모델링 시스템에 의해서 지원되고, 설계의 결과인 솔리드 모델로부터 해석용 박판 모델을 자동으로 추출해 낼 수 있으며, 설계 합성쪽의 모델의 변경 사항이 바로 해석쪽에 전달될 수 있다면, 기존에 개별적으로 분리되어 사용되던 CAD 시스템과 CAE 시스템이 통합되는데 큰 기여를 할 수 있을 것이다.

이를 위해 본 논문에서는 Fig. 2와 같은 비다양체 모델을 바탕으로 한 특징형상 기반 모델러를 개발하였다. 이 시스템에서는 CAD와 CAE 시스템에서 사용되는 기하학적 모델들이 하나의 비다양체 자료 구조로 표현이 되며, 설계에 필요한 솔리드 모델과 해석에 필요한 축약 모델에 대한 자료가 하나의 부품 모델에 함께 저장되어 필요에서 따라 원하는 모델을

추출해 낼 수 있다. 또한 비다양체 모델⁽¹⁰⁾을 바탕으로 한 시스템이기 때문에 특징 형상의 즉각적인 삭제와 특징 형상간의 상호 간섭에 대한 감지를 쉽게 구현할 수 있었다.

2. 사출 성형용 통합 CAD/CAE 시스템의 설계

본 장에서는 먼저 플라스틱 사출품에 대한 설계와 해석 작업을 적절히 지원해 줄 수 있는 통합 CAD/CAE 시스템을 구현하기 위해서는 어떠한 사항들이 요구되는지를 살펴 보고, 기존의 연구 성과를 바탕으로 실현 가능한 여러 가지 시스템 방식들을 도출해 낸 후, 그 각각의 방식이 앞의 시스템 요구 사항을 충족시키는 지 검토하도록 하였다. 다음, 앞의 검토 결과를 바탕으로 후보들 가운데 가장 적합한 방식을 선정한 후 이를 구현하기 위한 CAD/CAE 통합 시스템의 내부구조를 결정하도록 하였다.

2.1 기능적 요구 사항

앞장에서 지적한 바와 같이, 사출품 설계를 위한 특징 형상 및 솔리드 모델을 지원하고, 동시에 성형 과정 시뮬레이션 및 구조 해석을 위한 축약 모델을 지원할 수 있는 통합 CAD/CAE 시스템이 되기 위해서는 다음과 같은 요건을 구비해야 한다.

- 얇은 두께의 사출품을 쉽게 모델링 할 수 있어야 한다: 본 논문에서 주로 다루고자 하는 대상은 이들 사출품 가운데서도 주로 외장 부품에 해당하며 이들은 보통 넓은 표면적과 얇고 균일한 두께를 가지고 있으므로 이를 손쉽게 모델링할 수 있는 기능이 제공되어야 한다.

- 특징 형상을 사용한 설계가 가능해야 한다: 사출품을 설계할 때는 먼저 전체 형상에 해당하는 주 형상을 결정한 다음, 기능적인 요구에 따라 리브나 보스와 같은 부 형상들의 크기와 위치를 결정하게

된다⁽²⁾. 따라서 설계를 지원하는 3차원 CAD 시스템은 이들 특징 형상 단위로 초기 설계 및 설계 변경이 가능하고, 그 작업 결과가 솔리드 모델로 표현될 수 있어야 한다.

- 해석용 기하학적 모델이 설계 중 손쉽게 제공될 수 있어야 한다: 사출 성형용 통합 CAD/CAE 시스템에서는 설계 도중이나 설계 변경 시 생산 과정 중의 문제점을 발견하기 위한 해석 작업을 쉽게 수행할 수 있어야 하며, 이를 위해서는 제품의 중립 면에 대한 셸 메쉬를 손쉽게 제공해야 한다. 이러한 셸 메쉬들을 만들기 위해서는 먼저 사출품의 주 형상을 박판 형태의 축약된 형태로 변환시키고, 그 밖의 부 형상들은 설계자가 정한 메쉬의 크기를 고려하여 박판 혹은 와이어프레임으로 적절히 변환시켜야 하는데 이처럼 메쉬 생성 직전 단계의 모델을 해석용 축약 모델이라 부르며, 이에 대한 예가 Fig. 3에 나타나 있다.

2.2 관련 연구

본 장에서는 사출 성형 제품의 설계 및 해석을 지원하기 위해 지금까지 진행된 연구와 앞의 각 기능적 요구 사항과 관련된 분야의 연구 활동에 대하여 살펴보도록 하겠다.

2.2.1 사출 성형 제품의 설계 및 해석

Huh등⁽²⁾은 사출 성형 제품의 초기 설계를 지원해 줄 수 있는 지식 기반 설계 시스템을 개발하였다. 이 시스템은 최적의 리브 및 게이트 설계를 위한 RIBBER와 GATEWAY라는 전문가 시스템을 설계 결과를 표현하기 위한 3차원 형상 모델러로 구성되어 있으며, 전문가 시스템을 개발하기 위하여 리브, 보스 등 부 형상들에 대한 경험적인 지식과 수식을 수집하여 지식 기반 모듈(knowledge-based module)의 규칙으로 만들었다. Ishii등⁽³⁾은 사출품 설계 및 제조 각 분야의 전문가의 지식과 각종 자료를 바탕으로 제품 설계가 사용자의 요구 사항, 금형 제작과 사출

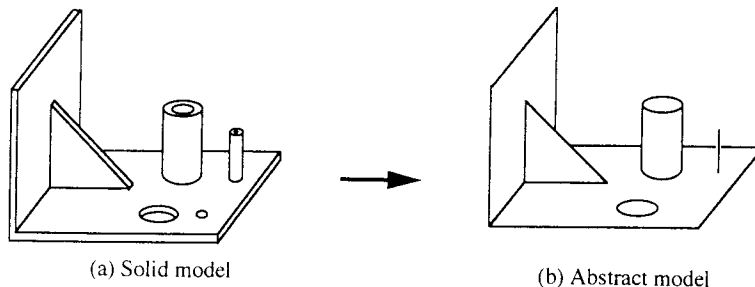


Fig. 3. Example of abstract model for analysis of injection molding process.

성형의 제한점들에 대하여 얼마만큼 적합하게 설계되었는지를 판단하는 설계 적합성 해석(Design Compatibility Analysis) 방법과 이를 구현한 시스템을 제시하였다. Gadh⁽¹¹⁾은 제품의 성형성 판정을 위한 수치 해석 방법의 대안으로 전문가 지식을 바탕으로 한 시스템의 역할을 강조하고, 지식 기반 전문가 시스템을 위한 특징 형상의 표현 및 추출에 대하여 언급하였다.

사출 성형 과정은 충전(filling), 압입(packing), 냉각(cooling)의 일련의 과정으로 이루어지며, 성형시 발생하는 제품의 불량 및 사출 성형 조건을 예측하기 위한 많은 연구들이 행하여져 왔다.^(6,7,8) 이러한 연구들 바탕으로 상용화된 CAE 시스템이 등장했으며, 그 가운데 Austin⁽¹²⁾에 의해 개발된 MOLD-FLOW⁽¹³⁾와 Wang⁽¹⁴⁾이 Cornell Injection Molding program을 통하여 개발된 C-FLOW⁽⁹⁾가 가장 잘 알려져 있다. 이들 시스템은 주로 충전 과정의 시뮬레이션에 초점이 맞추어져 있으나 최근에는 압입 및 냉각 과정에 대한 시뮬레이션을 추가 확장하여 MOLDFLOW는 MF/FLOW, MF/COOL, MF/WARP 등을 포함하게 되었으며, C-FLOW는 C-PACK, C-COOL등을 함께 묶어 C-MOLD라는 상품으로 시장에 다시 내놓았다.

2.2.2 얇은 두께의 솔리드 모델링

지금까지 얇은 두께의 솔리드를 쉽게 모델링하기 위한 연구는 크게 솔리드 모델의 오프셋(offset)을 이용한 방법과 먼저 박판 모델을 생성시킨 후 이를 솔리드로 변환시키는 방법이 있다.⁽¹³⁾ Lee⁽¹³⁾이 제시한 솔리드의 오프셋을 이용한 방법에서는 먼저 물체의 외곽 혹은 내곽의 형상을 솔리드로 모델링한 다음, 그 모델을 두께만큼 오프셋 시킨 또 하나의 모델을 생성시켜, 이 두 모델간에 불리안 빼기 작업을 하여 얇은 두께의 솔리드를 만들어 낸다. 그러나 이 방법은 불리안 작업을 바탕으로 하고 있기 때문에 많은 계산 시간을 필요로 하며, 다수의 구멍과 곱힘 부분이 있는 경우나 두께 면이 단이 진 경우 등에는 효과적으로 사용할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 이러한 단점을 극복하기 위한 방법으로 Stroud⁽¹⁴⁾와 Lee⁽¹⁵⁾은 박판 모델의 오프셋을 이용한 방법을 제시하였다. 여기서는 먼저 물체의 외곽 혹은 내곽의 형상을 박판 모델로 모델링한 후 이를 오프셋 시켜 솔리드 모델을 얻는다. 그러나 여기에서의 박판 모델은 솔리드의 자료 구조를 사용하여 표현한 것으로서, 이로 인하여 박판 형상의 표현과 모델링 과정에서 발생하는 비다양체적인 상황을 적절히 지원할 수

가 없었다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 이상현⁽¹³⁾은 비다양체 자료 구조를 바탕으로 한 박판 형상 모델링 및 솔리드로의 변환 기능을 개발하였다. 이 시스템에서는 박판 모델링 과정에서 발생하는 와이어프레임 및 박판 형상은 물론, 최종 솔리드 형상도 하나의 모델링 환경에서 지원할 수 있으며, 비다양체까지 확장된 오일러 작업을 사용함으로써 박판 모델링 기능 및 솔리드로의 변환 기능을 한층 쉽게 구현할 수 있었다.

2.2.3 특징 형상 기반 설계

특징 형상을 사용한 설계가 가능하기 위해서는 설계 시스템에서 특징 형상에 관한 정보를 생성, 조작할 수 있어야 한다. 특징 형상 정보를 생성시키는 주요한 방법으로는 특징 형상 인식과 특징 형상 기반 모델링이 있다.⁽¹⁶⁾ 특징 형상 인식은 부품의 기하학적 모델로부터 특징 형상을 추출되는 방식으로서 각 응용분야에 대하여 형상 인식 과정을 프로그래밍하여 사용할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 방식은 특징 형상 인식 기법에 한계가 있으며, 특징 형상간 상호 간섭 등이 발생하는 복잡한 경우에는 인식이 곤란하고, 본래의 설계자의 의도가 상실되는 단점을 가지고 있다. 이에 반해 특징 형상 기반 모델링은 특징 형상을 사용하여 부품을 모델링하는 방식으로서 부품의 특징 형상 정보가 설계 단계에서 생성되며, 따라서 설계자가 이용할 수 있는 정보가 즉시 부품 모델 안에 포함될 수 있다. 그러나 이 방식에서는 응용 분야에 대한 특징 형상들의 라이브러리가 사용 전에 이미 구축되어 있어야 하며, 사용할 수 있는 특징 형상의 집합이 한정되어 있고 특정한 응용 분야에 국한되어 있기 때문에 다른 응용 분야들간에 서로 공유되기 힘든 점을 가지고 있다. 또한 지금까지의 대부분의 특징 형상 모델링 시스템들은 전통적인 솔리드 모델링 시스템의 불리안 작업을 사용하여 구현되었기 때문에, i번째 생성된 특징 형상을 취소하고자 할 경우에는 i번째 이후에 수행되었던 작업들을 모두 취소(undo)한 다음에 i+1번째부터의 작업들을 다시 수행시키도록 해야만 했다. 또한 특징 형상을 나타내는 형상 모델의 경계들 가운데 일부는 불리안 작업 후 부품 형상 모델에서 사라지기 때문에, 그 부분에 대해 특징 형상의 기하학적인 상호 간섭이 발생할 경우 이를 감지해 내는 것이 대단히 어려웠다.

이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로서 Pratt⁽¹⁷⁾는 일찍이 비다양체 특징 형상 표현법(non-manifold feature representation)의 도입을 제안하였고,

Masuda⁽¹⁸⁾는 형태 특징 형상의 기하학적인 면만을 고려하여 특징 형상 모델링을 비다양체 불리안 작업을 통하여 구현하였다. 이 표현 방식에 의하면 각각의 특징 형상들은 분류화 된 모델로 표현이 되고, 모델은 이들 특징 형상들 간의 비다양체 불리안 작업의 결과인 세포 구조형의 비다양체 모델로 저장된다. 이 모델에서는 부품의 최종 형상에서 나타나지 않는 특징 형상을 구성하는 면들도 같이 저장되기 때문에, 특징 형상의 즉시 삭제나 특징 형상들간의 상호 간섭의 발생 검사에 필요한 모든 정보를 저장할 수 있는 장점이 있다.

한편 특징 형상 기반 모델링이 보다 다양한 응용 분야를 지원할 수 있도록 하기 위하여 설계 특징 형상(design feature)으로부터 각 응용 분야의 특징 형상들로 변화시키는 것에 대한 연구가 행해져 왔다. Rosen 등⁽¹⁹⁾은 사출 성형과 다이 캐스팅에서 가격 산출을 위하여 설계 특징 형상으로부터 가공 특징 형상(manufacturing feature)으로 직접 변화시키는 방법을 제시하였으며, 나아가 Rosen 등⁽²⁰⁾은 특징 형상 표현들 간의 변환을 위한 일반적인 방법론으로서 filtration, selection, aggregation의 3단계로 구성된 변환 과정을 제시하였다.

2.2.4 중립 축 변환

중립 축 변환(medial axis transformation, MAT)은 주로 이미지 프로세싱이나 패턴 인식 분야에서 2차원 도형 혹은 화소(pixel) 데이터를 대상으로 이들을 단순화시키기 위한 방법으로 널리 사용되어왔다. 최근에 3차원 형상에 대한 중립면을 찾아 이를 여러 응용 분야에 사용하는 연구들이 진행되어 왔으며, 명칭은 기존의 2차원 대상에 대한 용어인 중립 축이라는 용어가 3차원에까지 그대로 확대 사용되어왔다. 3차원 중립 축 변환은 Nackman 등⁽²¹⁾에 의해서 최초로 언급되었으며, 이후 Hoffmann⁽²²⁾은 3차원 CSG 모델에 대한 중립 축 변환 알고리즘을 제시했다. Yu 등⁽²³⁾은 B-rep 솔리드 모델에 대하여 경계면을 Delaunay trianglization을 하여 이를 바탕으로 근사적인 중립 축을 점들의 집합으로 구해내는 알고리즘을 제시했다. 이용구⁽²⁴⁾는 B-rep 솔리드 모델을 복셀(voxel)화시키지 않고 모델의 경계 정보를 직접 이용하여 중립 축상의 점들을 생성시키고 이를 바탕으로 셀 메쉬를 만드는 방법을 연구하였다. 한편, Hall⁽²⁵⁾ 등은 솔리드 모델을 복셀로 만든 후 MAT를 근사화한 skeletal transformation을 사용하여 중립 축 모델을 만든 후 이로부터 특징 형상을 추출하는 과정을 제안함으로써 중립 축 변환에 대한 응용 예를 보여

주었다. 그러나 3차원 중립 축 변환 과정은 아직 많은 계산 시간을 요하며 대부분 변환 결과가 곡면이 아닌 근사적인 점들의 집합으로 구해내는 수준에 머물러 있다.

2.2.5 비다양체 형상 모델링

3차원 형상 모델링 분야에서는 근래 기존의 솔리드 모델러에 대한 대안으로 비다양체 형상 모델러가 제시되었으며, 이에 대한 기초 연구 및 시스템의 상용화와 다양한 응용 분야에의 적용이 확대되어 왔다. Weiler⁽¹⁴⁾는 물체의 모서리에 인접한 면들을 순서적으로 저장한 Radial Edge Structure라는 경계 표현 방식의 자료 구조를 제안함으로써, 하나의 모서리에 2개 이상의 면들이 인접한 비다양체적인 상황을 표현할 수 있도록 하였다. Choi⁽²⁶⁾는 zone과 disk라는 위상 요소를 추가로 도입하여, Weiler의 자료 구조에서 불완전하게 처리되었던 꼭지점에서의 이웃 관계를 명확히 나타내는 Vertex-Based B-rep을 제안하였다. Yamaguchi 등⁽²⁷⁾은 꼭지점, 모서리, 면 그리고 영역(region)의 기본적인 위상 요소들의 인접 관계를 나타내기 위해 6가지의 coupling entity들을 새로 도입하여 이웃 관계에 바탕을 둔 비다양체 표현을 제시하였으며, 비다양체 물체에 대한 오일러-포앙카레 공식(Euler-Poincare formula)을 바탕으로 확장된 오일러 작업자를 제시하였다. 최근에는 이칭현⁽²⁸⁾이 다양체 모델을 위한 Half-edge data structure를 비다양체 영역까지 확장시킨 계층 구조적인 경계 표현 방식을 제시하였으며, 효율을 고려한 최소한의 비다양체 오일러 작업자의 집합을 제안하였다. 한편, 비다양체 모델들간의 불리안 작업에 관한 연구들은 Choi⁽²⁶⁾, Masuda⁽¹⁸⁾, Crocker 등⁽²⁹⁾에 의하여 행해졌으며, 이들은 공통적으로 "병합과 선택(Merge & Selection)"의 개념을 사용하여 불리안 작업을 구현하고 있다. 또한 김성환⁽³⁰⁾은 이 "병합과 선택" 알고리즘을 이상현의 비다양체 자료 구조 및 오일러 작업자를 바탕으로 구현하였다.

2.3 조합 가능한 CAD/CAE 통합 방식

앞에서 살펴본 지금까지의 연구 성과들을 바탕으로 필요한 기능적 요구 사항을 만족하는 사출 성형 제품용 통합 CAD/CAE 시스템을 구축할 경우 여러 가지 조합이 가능하나, 설계된 결과를 시스템 내에서 어떤 형태로 저장하는가에 따라 더 다음의 세 가지 방식으로 크게 나눌 수 있다.

- 솔리드 모델만을 저장하는 방식
- 솔리드 모델과 특징 형상 정보를 저장하는 방식

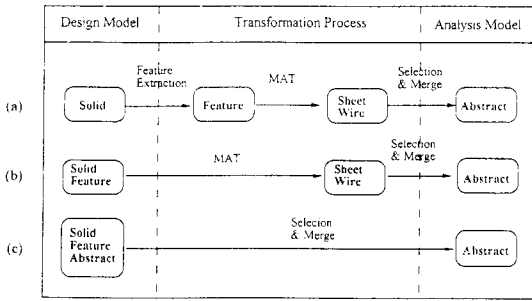


Fig. 4. Extraction of abstract model for analysis from design model.

- 솔리드 모델과 특징 형상 정보, 그리고 해석용 축약 모델을 동시에 생성 저장하는 방식

각 방식에 따라 저장된 설계 결과로부터 해석에 필요한 축약 모델을 얻어내고자 할 때는 각각 Fig. 4에 나타난 것과 같은 변환 혹은 추출 과정을 거치게 된다. 그러면 이들 각각의 방식에 대한 축약 모델 생성 과정을 살펴보고 CAD/CAE 통합화에 각 방식이 얼마나 유리한 지를 서로 비교해 보도록 하겠다.

첫번째 Fig. 4(a)의 솔리드 모델만을 저장하는 방식에서는 해석을 위한 메시가 필요한 경우에는 먼저 메시 생성의 대상이 되는 해석용 축약 모델을 솔리드 모델로부터 추출해 내야 한다. 이를 위해서 먼저 솔리드 모델로부터 부 형상에 해당되는 특징 형상들을 추출해 내어 축약시키고, 주형상에 대해서는 중립 축 변환(medial axis transformation; M.A.T.) 작업을 수행하여야 한다. 이 과정은 많은 계산량을 요하며, 만일 이를 설계와 병진해서 해석을 반복하는 경우 모델 전체에 대한 해석 모델의 추출 과정을 매번 반복해야 하므로 많은 계산 시간을 소모하게 된다. 또한 이 방식은 설계 결과에 특징 형상에 대한 정보가 없기 때문에 설계 변경 시에는 직접 솔리드 모델의 형상을 설계자가 형상 모델러를 사용해서 변화시켜 주어야 한다.

두번째 Fig. 4(b)의 방식에서는 사출품의 설계가 특징 형상 기반 모델링 시스템을 바탕으로 이루어지고, 그 결과가 솔리드 모델 및 특징 형상 정보로 저장된다. 또한, 해석용 축약 모델이 필요한 경우에는 특징 형상들 가운데 주 형상과 부 형상들 각각에 대하여 중립면 찾기 등의 과정을 거쳐 박판과 와이어프레임으로 된 축약 모델로 만든 다음, 이들을 조합하여 해석용 모델을 만들어 낸다. 솔리드만을 저장하는 앞의 방식에 비하여 이 방식은 설계 시의 사용한 특징 형상의 정보를 이용함으로써 특징 형상

추출에 필요한 노력을 절약할 수 있다. 그러나 이 경우도 앞의 방식과 마찬가지로 설계 도중 해석용 모델이 필요할 때마다 각각의 특징 형상에 대한 중립 축 찾기를 수행하는 번거로움이 여전히 남아 있게 된다.

세번째 Fig. 4(c)의 방식에서는 특징 형상 정보와 솔리드 모델뿐만 아니라 해석용 축약 모델을 설계 단계에서 동시에 만들어 저장시킨다. 특징 형상 단위로 제품이 설계될 때 각 특징 형상에 대한 솔리드 모델과 해석용 축약 모델이 동시에 만들어 저장되며, 설계 도중 해석이 필요한 경우에는 특징 형상에 대한 정보를 바탕으로 바로 해석용 축약 모델을 제공해 줄 수 있다. 이 방식은 앞의 두 가지 방식들에 비하여 설계의 변경 사항이 바로 해석용 모델에까지 파급되며, 설계 도중 해석에 필요한 축약 모델을 즉각적으로 제공해 줄 수 있는 장점을 가지고 있다.

2.4 통합 CAD/CAE 시스템의 설계

앞 장에서 언급한 세 가지 CAD/CAE 통합 방식 가운데 가장 동시 공학(concurrent engineering)적인 요구 사항을 만족시켜 주는 방안은 세 번째의 방식, 즉, 특징 형상 정보와 솔리드 및 해석용 축약 모델을 동시에 저장하는 방식이었다. 이러한 방식을 충실히 지원해 줄 수 있는 CAD/CAE 통합 시스템을 구축하기 위하여 본 논문에서는 다음과 같은 설계 결정 사항을 내렸다.

- 특징 형상 기반 모델링 기능과 설계된 특징 형상으로부터 CAE등 응용 분야로 특징 형상을 변환시키는 기능을 제공하도록 한다. 시스템의 기능적 요구 사항에 나타난 바와 같이 사출 성형용 CAD시스템은 특징 형상 단위로의 설계가 지원 가능해야 한다. 또한 CAE등 응용 분야에서 필요로 하는 특징 형상들은 설계 특징 형상의 정보를 이용하면 쉽게 얻어낼 수 있으므로 솔리드 모델로부터 특징 형상을 추출하는 방법보다는 설계 특징 형상을 응용 분야의 특징 형상으로 변환시키는 시스템을 개발하는 것이 보다 효율적이다.

- 비다양체 형상 모델링 시스템을 바탕으로 한다. 비다양체 자료 구조는 솔리드 모델 뿐만 아니라 와이어프레임, 곡면, 세포 구조의 모델 및 이들의 복합체를 하나의 자료 구조로 나타낼 수 있으며, 따라서 설계에 사용되는 솔리드 모델뿐만 아니라 해석용 축약 모델도 함께 표현 할 수 있다. 또한 사출물을 모델링할 때 먼저 박판 형태의 비다양체 모델을 만든 후, 오프셋 기능을 사용하여 그로부터 일정한 두께

의 솔리드로 변환시키면 얇은 두께의 물체를 쉽게 모델링할 수 있다. 또한 비다양체 자료 구조로는 세 포 구조의 모델도 표현이 가능하여 특징 형상들간의 불리안 작업에 의해 지워지는 면들까지도 저장해 둘 수 있기 때문에, 모델링 순서와 관계없이 특징 형상을 즉시 삭제할 수 있으며, 특징 형상들 간의 상호 간섭을 쉽게 탐색해 낼 수 있다.^(17,18)

• 솔리드 모델과 해석용 축약 모델이 병합된 부품 모델을 사용하도록 한다. 각 특징 형상에 대한 솔리드 형상뿐만 아니라 해석용 축약 모델을 동시에 부품 모델에 집어 넣어 설계 및 해석에 필요한 모든 기하학적 자료가 하나의 부품 형상 모델 내에 존재하도록 한다. 그러므로써 설계 변경 사항이 즉각 해석용 모델에까지 파급되도록 하고, 설계 도중 해석이 필요한 경우에는 부품의 형상 모델로부터 간단한 여과 과정을 통하여 해석용 축약 모델을 바로 얻어낼 수 있도록 한다.

• 객체 지향 프로그래밍 기법을 사용하도록 한다. 특징 형상 기반 모델러는 미리 정의되어 있는 특징 형상을 사용하기 때문에 새로운 특징 형상의 사용이 필요한 경우 특징 형상 라이브러리의 확장에 어려움이 있다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 최근에 널리 각광받고 있는 객체 지향 프로그래밍 기법을 채택함으로써 사용자가 원하는 특징 형상을 프로그램 코드의 변화 없이 자유로이 추가시킬 수 있도

록 하였다.

이상과 같은 설계 결정 사항을 바탕으로 구현된 본 논문의 CAD/CAE 통합 시스템은 Fig. 5에 나타난 바와 같이 크게 다음의 5가지의 부 시스템(sub-system)으로 이루어져 있다.

- 사용자와의 인터페이스
- 특징 형상 모델링 셸
- 응용 분야로의 특징 형상 변환 셸
- 비다양체 형상 모델링 시스템
- 부품 데이터 베이스

이들 가운데 주요한 3가지 부 시스템, 즉, 특징 형상 모델링 및 변환 셸과 비다양체 형상 모델링 시스템에 대하여 간략히 설명하도록 하겠다.

특징 형상 모델링 셸에서는 사용자가 준 입력을 바탕으로 특징 형상에 대한 인스턴스(instance)를 생성, 파괴, 수정하며, 특징 형상들 간의 관계를 유지 관리한다. 이를 위해 필요한 경우 비다양체 모델러에게 특징 형상의 기하학적 모델을 생성 혹은 파괴 시키라는 메시지를 보내는 역할을 한다.

특징 형상 변환 셸에서는 설계 특징 형상으로부터 CAE, CAM, CAPP등과 같은 다른 응용 분야에 필요한 특징 형상들로 변환시키는 작업을 한다. 현재 본 시스템에서는 사출 성형 공정에 대한 해석 프로그램인 C-FLOW에 대한 변환 모듈만을 시범적으로 개발 하였으며, 그밖에 다른 응용 분야에 대해서도 계속 확장해 나갈 예정이다.

비다양체 형상 모델링 시스템에서는 특징 형상 모델링 모듈과 변환 모듈로부터 기하학적 모델의 생성, 파괴, 수정, 정보 참조 등에 대한 메시지를 받아 이를 수행하는 역할을 한다. 특히 이 모델러는 특징 형상들의 솔리드 모델과 축약 모델이 병합(merge) 과정을 통하여 만들어진 부품의 병합체(merged-set) 모델을 관리한다. 본 시스템에서는 특히 얇은 두께의 사출품을 쉽게 모델링할 수 있는 박판 모델러(sheet modeler)를 개발하였으며, 그 모델러에서 만들어진 박판 형태를 솔리드로 자동 변환 시켜주는 기능도 함께 개발하였다.

위의 시스템을 사용하여 설계와 해석을 수행하는 방법은 다음과 같다. 먼저, 비다양체 형상 모델러에서 불리안 작업, 박판 형상 모델링 및 솔리드로의 변환 기능, 그리고 각종 모델링 기능들을 사용하여 제품의 주 형상에 해당하는 솔리드 모델을 생성시킨다. 다음, 특징 형상 모델링 시스템에서 주 형상인 솔리드 모델을 기본 특징 형상(base feature)으로 등록하고 필요한 부 형상들을 만들어 나감으로써 부품

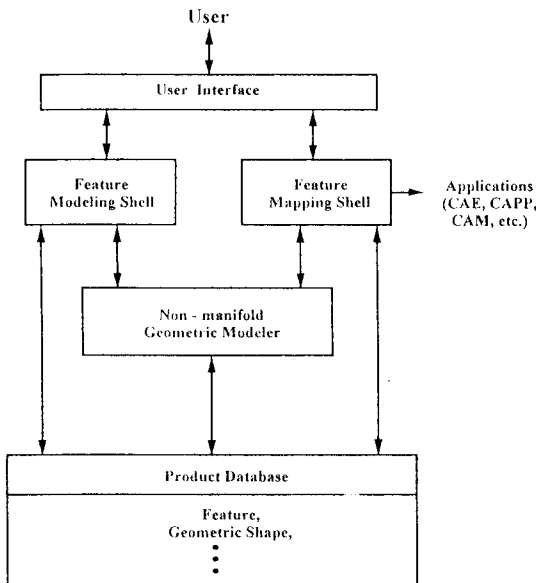


Fig. 5. Architecture of our integrated CAD/CAE system.

에 대한 모델을 완성한다. 이때 해석에 필요한 축약 모델도 부품 모델내에 함께 포함되어 있다. 끝으로 특징 형상 변환 시스템에서 해석에 필요한 메쉬 모델을 만들어 내는 작업을 수행시킨다. 시스템 내에서는 축약 모델을 추출해 낸 후, 메쉬 생성 과정을 통하여 해석에 필요한 최종적인 메쉬 형상을 만들어 낸다. 그러면 위 시스템의 각 부 시스템에 대하여 상세히 설명하도록 하겠다.

3. 비다양체 형상 모델링 시스템

본 논문에서 사용하고 있는 비다양체 형상 모델링 시스템의 전체 구조는 Fig. 6에 나타난 바와 같이 기하학적 형상 모델링 커널 부분과 응용 프로그램과의 인터페이스 부분 그리고 사용자 인터페이스 부분으로 이루어져 있다. 이 비다양체 형상 모델러의 입장에서는 특징 형상 모델링 셸과 특징 형상 변환 셸도 일종의 응용 프로그램에 속하게 된다. 이 시스템의 형상 모델링 커널의 가장 기초가 되는 모듈들은 위상 정보와 기하학적 정보를 관리하는 Topology와 Geometry 모듈이며, 그 위에 이들을 사용한 형상 모

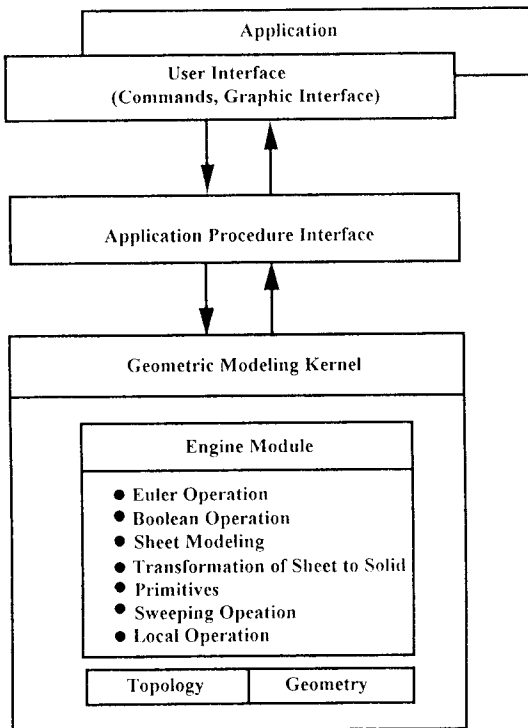


Fig. 6. System architecture of non-manifold geometric modeling system.

델링 엔진 모듈들이 있다. 모델링 엔진 모듈로는 위상 요소들을 조작하는 가장 기본적인 함수인 오일러 작업과 육면체, 원기둥, 원뿔 등의 기초적인 입체 형상을 모델링해 주는 기본 입체 생성 기능, 그리고 모델들간의 합 집합, 차 집합, 교 집합을 지원하는 불리안 작업, 얇은 두께의 형상을 손쉽게 모델링해 주는 박판 모델링 기능 및 박판을 솔리드로 변환 시켜 주는 기능, 그리고 지정된 점 또는 선, 면을 주어진 경로를 따라 스위핑 시켜주는 스위핑 기능, 그밖에 부분적으로 모델을 수정해 주는 각종 부분 수정 작업 등이 있다.

이 시스템에서는 이상현⁽²⁸⁾이 제안한 비다양체 모델의 자료 구조를 사용하였다. 여기에 사용된 위상 요소는 대부분의 자료 구조에서 공통으로 사용되는 꼭지점, 모서리, 면, 영역, 루프와 셸의 기본적인 위상 요소들과 이들 요소들간의 인접 관계들을 나타내기 위하여 특별히 도입한 부분 면(partial face), 부분 모서리(partial edge) 그리고 부분 꼭지점(partial vertex)의 3가지 보조적인 위상 요소들이다.

이 시스템에서 구현된 비다양체 모델들간의 불리안 작업은 김성환⁽³⁰⁾이 개발한 "병합과 선택(Merge & Selection)" 개념을 바탕으로 한 불리안 작업이다.

플라스틱 제품들은 대부분 두께가 얇고 일정하기 때문에 이들을 기존의 불리안 작업이나 스위핑 작업 등을 사용하여 모델링을 하려 할 경우 상당한 불편이 뒤따른다. 이러한 불편을 해소시키기 위하여, 물체의 외곽 혹은 내곽의 형상을 박판 모델로 모델링한 후, 이를 오프셋 시켜 솔리드 모델을 얻는 모델링 기능을 개발하였다.⁽¹³⁾ 박판 모델의 생성 및 수정을 위하여 본 시스템에서는 사용자가 비다양체 오일러 작업을 직접 사용할 수 있도록 하고 있으며, 기존의 박판 형상 모델링 시스템에서와 같이 다음의 상위 모델링 기능 사용 시 모서리의 기하학적 형상을 손쉽게 입력시키기 위하여 2차원 곡선 모델링 시스템이 함께 제공된다.

- 초기 평면 박판을 생성시키는 기능
- 박판에 새로운 면을 첨가시키는 기능
- 박판에 구멍을 내는 펀칭 기능
- 박판의 특정한 모서리를 중심으로 박판을 접는 벤딩 기능
- 모서리를 스위핑 시켜 면을 생성시키는 기능
- 박판의 일부를 눌러 내리는 드로잉 기능
- 박판이 만나는 모서리에 라운딩을 주는 기능
- 박판에서 솔리드로의 변환 기능

4. 특징 형상 모델링 시스템

4.1 특징 형상의 표현

부품에 대한 정보는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 크게 두 부분, 특징 형상에 대한 정보와 부품의 기하학적 모델로 구성되어 있다. 특징 형상들은 부품의 주형상에 해당되는 기본 특징 형상(base feature)으로부터 출발하여 부모와 자식간의 관계를 갖는 그래프로 서로 연결되어 있으며, 이들이 생성된 순서는 부품 모델에서 특성치(attribute) 영역에 기록해 두고 있다. 부품에 대한 기하학적 모델은 특징 형상들간의 불리안 작업의 결과인 비다양체 병합체(merged-set) 모델로 표현이 된다. 여기서 병합체 모델이란 불리안 작업에 참여한 모든 기본 형상 모델들의 위상 요소들과 그들간의 교차에 의해 발생된 모든 위상 요소들에 대한 자료를 모두 저장하고 있는 비다양체 모델로서 각 위상 요소들은 자신들이 어떤 기본 형상 모델의 어떤 위상 요소로부터 유래했는지에 대한 기록들을 가지고 있다. 이러한 기록들은 특징 형상의 삭제 시, 특징 형상들간의 상호 간섭 체크 시, 그리고 해석용 축약 모델의 추출 시 사용된다.

특징 형상이 가지고 있는 자료는 Fig. 8에 보인 것과 같이 모든 특징 형상들에 공통인 자료와 각각의 특징 형상에 따라 서로 다른 개별적인 자료로 구성되어 있다. 즉, 특징 형상은 기본 클래스인 Feature라

는 클래스와 이로부터 파생된 클래스인 Rib, Boss등과 같은 특정한 특징 형상에 대한 클래스의 두 레벨로 나뉘어 정의된다. 기본 클래스인 Feature는 Fig. 8(b)에 나타난 바와 같이 모든 특징 형상에 공통적으로 필요한 자료들을 저장하고 있으며, Boss와 Rib 같은 파생 클래스들은 자신에 특정한 자료들을 저장하며 공통의 데이터들은 기본 클래스로부터 상속 받는다. 즉, Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이, Rib 클래스는 리브의 단면 형상을 지정하는 변수인 리브의 두께, 높이, 구배(draft), 필렛 반경에 대한 값을 저장하고 있으며, Boss 클래스는 보스의 높이, 보스 벽두께, 보스 바닥 두께, 구배에 대한 값을 저장하고 있다. 또한 특징 형상들에 대한 공통의 메소드(method)인 create_solid_model(), get_mapping_model_for_cflow() 등과 같은 멤버 함수(member function) 들은 Feature 클래스에 가상 함수(virtual function)로 선언되어 있고, Boss 나 Rib등과 같은 파생 클래스에는 이 가상 함수들에 대한 정의가 실제로 구현되어 있다. 시스템 내에서는 단지 Feature에 대해 이 함수들을 수행하도록 메시지를 보내면, Feature의 인스턴스 내에 실제로 어떤 특징 형상이 있는가에 따라서 그 특징 형상의 클래스 내에 정의된 함수가 실제 수행되게 된다. 따라서 새로운 특징 형상을 추가할 때에는 이 공통의 메소드에 대한 구현만을 정확히 해주면 되므로, 사용자는 자신이 필요한 특징 형상의 라이브러

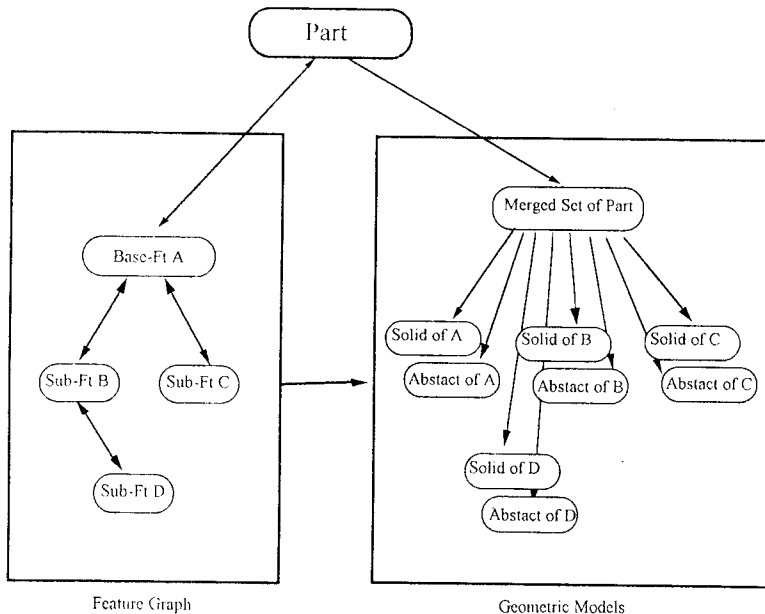


Fig. 7. Structure of the part model.

```

class Part : public Entity {
    Feature *base_feature; // pointer to base feature
    Model *model; // pointer to merged-set model
    Part *next;
}

```

(a) Class for part

```

class Feature : public Entity {
protected:
    FeatureType feature_type;
    Part *part; // pointer to part
    Feature_list parent_features; // pointers to parent / child features
    Feature_list child_features;
    Model *solid_model; // pointer to solid model of feature
    Model *abstract_model; // pointer to abstract models of feature
    TransformMatrix matrix; // position & orientation
    Face_list reference_faces; // pointers to reference faces
public:
    virtual void create_solid_model(); // function to create a solid model
    virtual Model *get_mapping_model_for_cflow(double mesh_size);
}

```

(b) Base class for feature

```

class Rib : public Feature {
    double height; // shape parameters
    double thickness;
    double draft;
    double length;
public:
    void create_solid_model();
    Model *get_mapping_model_for_cflow(double mesh_size);
}

class Boss : public Feature {
    double height; // shape parameters
    double wall_thickness;
    double draft;
    double radius;
public:
    void create_solid_model();
    Model *get_mapping_model_for_cflow(double mesh_size);
}

```

(c) Derived classes for feature

Fig. 8. Classes for the part and feature.

리를 시스템 코드의 변환이 없이 바로 추가시킬 수 있다.

여기서 유의해야 할 점은 특징 형상에 따라 축약 모델을 하나 이상 가질 수 있으며, 그 기하학적인 형상도 와이어프레임, 박판, 혹은 솔리드의 다양한 형태가 될 수 있다는 것이다. 예를 들어, 보스는 축약

모델로서 와이어프레임과 원통형 박판 모델 두 가지가 가능하며, 구멍과 같이 삭감형(depression) 특징 형상의 경우는 솔리드 형상이 축약 모델이 될 수 있다. 이는 해석 시 메쉬의 크기에 따라 축약되는 방법이 복수 개로 존재하며, 본 시스템에서는 모든 가능한 축약 모델을 저장하고 있다가 그 가운데 조건에

맞는 것을 선택하여 추출해 내는 방식을 취하고 있기 때문이다.

이상과 같은 부품에 대한 표현이 실제 모델에 대해서 어떻게 나타나는지 Fig. 9에 간단히 소개되어 있다. Fig. 9(a)에 나타난 부품은 상자형의 주 형상에 부 형상인 리브와 보스가 각각 하나씩 붙어 있는 것으로서 이 부품에 대한 형상 모델은 각 특징 형상들의 솔리드 모델뿐만 아니라 축약 모델인 박판과 와이어프레임 모델까지도 모두 불리안 작업을 통해 병합되어 있는 다양체 모델이다. 이 부품에 대한 본 시스템 내에서의 표현은 Fig. 9(b)의 그림과 같이 된다. 부품을 나타내는 인스턴스 part1은 주 형상을 나타내는 base1와 부품 전체 형상을 나타내는 part1_model에 대한 포인터를 저장하고 있다. 특징 형상들은 자식과 어버이의 관계를 갖는 그래프로 서로 연결되어 있으며, 각각의 특징 형상들은 자신의 솔리드 모델과 축약 모델들을 가리키고 있으며, 이 형상 모델들

은 모두 부품의 병합체 모델인 part1_model에 병합되어 있다.

4.2 특징 형상의 생성

부품을 모델링하는 방법은 먼저 제품 전체의 형상인 주 형상을 만든 후, 그 위에 적당한 부 형상들을 첨가하여 최종 모델을 만들어 나간다. 단, 현재의 특징 형상 모델링 시스템에서는 사용자가 불리안이나 박판 모델링 기능과 같은 형상 모델러의 기능들은 사용하여 작업할 수 없고, 단지 특징 형상을 단위로 그것을 더하거나 수정하거나 없애는 방식만 사용할 수 있다. 그러면 특징 형상 모델링 시스템에서 부품을 모델링해 나가는 과정을 보다 상세히 설명하도록 하겠다.

먼저, 주 형상은 비다양체 모델링 시스템에서 제공하는 모델링 기능을 사용하여 만든다. 일반적으로 주 형상은 얇은 두께의 사출물이기 때문에, 앞서 소개한 박판 모델링 기능을 사용하여 외곽 형상에 대한 박판 형상을 만든 다음, 박판에서 솔리드로의 변환 과정을 거쳐 솔리드 형상을 만들면 손쉽게 주 형상을 만들 수 있다.

다음, 특징 형상 모델링 시스템을 작동시켜 비다양체 모델링 시스템에서 만들어진 하나의 솔리드 모델과 그것의 축약 모델을 주 형상으로 등록시킨다. 주 형상이 등록될 때 사용되는 축약 모델은 중립 축 변환(medial axis transformation)방법을 사용하여 얻어진 박판 모델을 사용할 수도 있고, 주 형상이 박판 모델을 오프셋 시켜 솔리드로 만든 경우에는 솔리드로 변환되기 이전의 박판 모델을 적당히 수정한 박판 모델을 사용할 수도 있다. 주 형상의 등록과 함께 새로운 부품 모델이 생성되며 그 부품 모델의 병합체 모델은 시스템 내부에서 주 형상의 솔리드 모델과 축약 모델간의 불리안 합 작업을 수행하여 생성된다.

끝으로 적당한 위치에 부 형상들을 만들어 나간다. 부 형상을 만들기 위해서 먼저 사용자가 메뉴에서 만들어 넣고자 하는 특징 형상을 선택하고, 필요한 데이터를 입력해 준다. 그러면 시스템은 먼저 새로운 특징 형상에 대한 클래스의 인스턴스를 생성시키고 입력 받은 데이터를 이에 채워 준 다음, 특징 형상들간의 관계 그래프에 연결시킨다. 그 다음 시스템은 부 특징 형상의 솔리드 모델과 축약 모델을 주어진 형상 변수에 맞추어 생성시킨 후, 부품의 병합체 모델에 이 두 가지의 모델들을 불리안 작업으로 병합시킨다. 이때 부 형상의 축약 모델은 주 형상

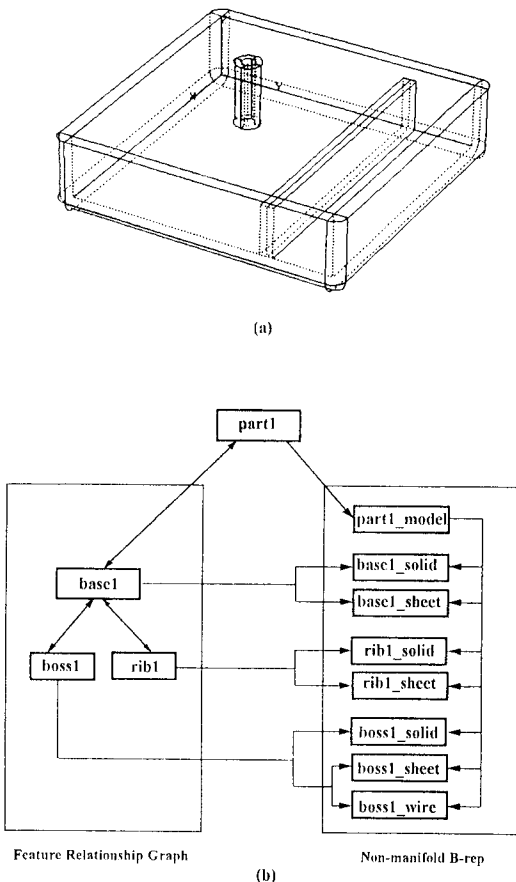


Fig. 9. Example of part representation.

의 축약 모델인 박판 모델에 이르도록 적절한 크기로 길이가 확장되어 있다.

4.3 특징 형상간의 상호 간섭 발생 검사

새로운 특징 형상을 집어 넣을 때 기존의 다른 특징 형상과의 기하학적인 상호 간섭이 발생하는 지는 Ownership이라는 자료 구조를 사용하여 부품의 병합체 모델의 각 꼭지점, 모서리, 면, 영역에 저장되어 있는 연혁 표식(history record) 정보를 참조하면 쉽게 알아 낼 수 있다. 이에 대한 자세한 설명은 참고 문헌⁽³⁰⁾에 나타나 있다.

각 위상 요소의 연혁 표식 정보에는 자신의 조상이 되는 위상 요소가 어느 특징 형상의 솔리드 모델에서 왔는지가 완전히 수록되어 있기 때문에, 새 특징 형상의 솔리드 모델과 교차가 일어나는 위상 요소들의 조상이 어느 특징 형상의 솔리드 모델에서 왔는지를 특징 형상 그래프를 순회하여 쉽게 찾아낼 수 있다.

이러한 상호 간섭이 발생한 경우, 기존의 특징 형상의 정의와 어긋나는 결과가 발생할 수가 있으나, 그 경우 어떻게 처리해야 하는가에 대해서는 사용자가 판단하여 임의로 처리하도록 하였다.

4.4 특징 형상의 제거

특징 형상의 제거는 먼저, 부품의 병합체 모델에서 그 특징 형상의 솔리드와 축약 모델에서 유래한 꼭지점, 모서리, 면 및 영역을 제거한다. 다음, 부품의 특징 형상 그래프에서 계층 관계를 고려하여 삭제될 특징 형상들을 찾아내 이를 없앤다. 본 시스템에서는 자신의 부모 특징 형상이 삭제되면 자식도 따라서 소멸되도록 되어 있으며, 복수 개의 부모를 가진 경우는 모든 부모가 삭제될 때 자식이 소멸되도록 하였다. 특징 형상이 제거된 후의 부품의 병합체 모델은 그 특징 형상에 의해 나타나지 못했던 부분들이 완전히 회복된 상태가 되는데, 이와 같이 특징 형상 제거후 원래의 형상으로서의 복귀가 솔리드 모델러를 바탕으로 한 시스템⁽³¹⁾에 비해 손쉬운 것은 비다양체 모델인 병합체가 생성된 모든 위상 요소들을 빠짐없이 저장하고 있기 때문이다.

5. 특징 형상의 변환

특징 형상 변환 셀에서는 설계 특징 형상으로부터 CAE, CAPP, NC 프로세싱 등과 같은 다른 응용 분야에 필요한 특징 형상들로 변환시키는 작업을 수행

한다. 본 논문에서는 Rosen등⁽²⁰⁾의 형상 변환을 위한 방법론을 수용하여 1차적인 설계 특징 형상 정보로부터 CAE 시스템에서 필요로 하는 2차적인 특징 형상으로 변환시키는 특징 형상 변환 셀을 개발하였으며 그 적용 대상을 C-FLOW로 선정하였다. 현재 본 시스템에서는 사출 성형 공정의 해석 프로그램인 C-FLOW에 대한 변환 모듈만을 시험적으로 개발하였으며, 그 밖의 응용 분야에 대해서는 차후 과제로 남겨 두었다. 그러면 먼저 C-FLOW에서 필요로 하는 모델, 즉, 2차 특징 형상들을 살펴보고, 본 시스템에서는 이 2차 특징 형상을 어떻게 생성시키는 지에 대해서 설명하도록 하겠다.

C-FLOW에서 솔리드 모델인 사출품으로부터 해석 모델을 만들어 나가는 방법은 C-FLOW User's Guide⁽⁹⁾에 상세히 소개되어 있는데, 이에 따르면 C-FLOW에서는 3각형 셀 메쉬인 linear triangle과 2노드 메쉬인 cold/hot solid runner, cold/hot annular runner, 그리고 connector의 총 6가지 종류의 FEM 메쉬를 입력 받고 있다. 3각형 셀 메쉬들은 사출품의 주 형상과 리브 형상을 나타내기 위해서 사용되고, 2노드 메쉬들은 보스, 핀, 런너(runner), 게이트(gate) 등을 나타내기 위해서 사용된다. 이러한 각종 유형의 메쉬들은 응용 프로그램인 C-FLOW를 위한 2차적인 특징 형상으로 파악될 수 있으며, 따라서 특징 형상 변환 시스템에서는 리브, 보스, 구멍과 같은 설계 특징 형상으로부터 C-FLOW용 2차 특징 형상인 메쉬들로 변환시키기 위한 작업을 해야 한다. 이 변환 작업은 크게 다음의 3단계를 거쳐 이루어진다.

I. 2차 특징 형상을 생성시키기 위해 필요한 정보들을 추출해 낸다. C-FLOW User's Guide에 소개된 바와 같이 메쉬를 만드는데 고려해야 하는 설계 정보는 사출품 설계 시 사용된 리브, 보스, 구멍과 런너, 게이트 등의 설계 특징 형상들과 일치한다. 본 시스템은 특징 형상 기반 모델링 시스템을 사용하여 설계를 하였기 때문에 별도의 특징 형상 정보 추출은 하지 않아도 되며, 설계 시 생성된 설계 특징 형상들에 관한 정보를 그대로 사용하면 된다.

II. 축약 모델을 만드는 데 기여하는 특징 형상들과 부품 병합체 모델 내의 위상 요소들을 선택하는 작업을 한다. 특징 형상의 선택 방법은 C-FLOW User's Guide에 지시된 방법에 준하며, 부품 병합체 모델 내의 위상 요소들을 선택하는 방법은 불리안 작업의 선택 알고리즘을 사용하였다.

III. 앞 단계에서 선택된 위상 요소들만으로 구성된 해석용 축약 모델을 만들고, 이 축약 모델에 대해

C-FLOW를 위한 셀 메쉬 생성 과정을 수행시킨다.

그러면 이 세 단계 가운데 두 번째의 위상 요소 선택 작업과 세 번째의 축약 모델 생성 및 메쉬 생성 작업에 대하여 좀더 자세히 설명하도록 하겠다.

5.1 해석용 축약 모델에 기여할 위상 요소들의 선택

여기서는 해석용 축약 모델을 만드는데 기여하는 부품의 병합체 모델 내의 위상 요소들을 선택하여 표시해 두는 작업을 한다. 이를 위해서 먼저 각 특징 형상의 축약 모델들 가운데 해석용 축약 모델에 참여하는 것들을 선택한다. 이는 특징 형상에 따라 복수 개의 축약 모델을 가지고 있어 메쉬 크기에 따라 이 가운데 하나를 선택해야 하는 경우와 혹은 특징 형상을 제외시켜야 하는 경우가 있기 때문이다. 예를 들어, 보스의 경우는 와이어프레임과 박판 형태의 축약 모델을 가지고 있으며 설계 작업 중 이들을 모두 부품 병합체 모델에 포함시켜 놓았는데 보스의 직경이 메쉬 크기에 비해 작을 때는 와이어프레임을, 그보다 클 때에는 박판 형태로 축약 모델에 참여하게 해야 한다. 또한, 구멍인 경우는 메쉬의 크기에 비해 직경이 작을 경우 축약 모델에서 생략시켜야 한다. 실제 프로그램에서는 메쉬 크기를 입력으로 받아 적당한 축약 모델에 대한 포인터를 리턴시켜 주는 각 특징 형상 클래스의 멤버 함수로 구현되어 있다.

다음은 부품 모델이 가지고 있는 특징 형상들의 적용 순서를 참조하여 각 특징 형상의 축약 모델들의 CSG 트리(tree)를 얻어 내는 일이다. 이는 부품의 병합체 모델의 위상 요소들 가운데에서 어떤 것이 해석 모델에 포함될 것인가를 이 CSG 트리를 기준으로 가려내기 때문이다. CSG 트리를 추출해 내는 방법은 각각의 특징 형상들이 자신의 유형이 protrusion 혹은 depression 인가에 따라 '+' 혹은 '-'의 부호를 갖도록 하여, 원래 베이스 특징 형상의 모델에 대하여 그러한 불리안 작업이 가해진 형태의 CSG 트리를 만들어 낸다. 실제의 프로그램에서는 일단 베이스 모델에 대해 일련의 불리안 작업을 행하는 문자열을 만든 다음, 그 문자열을 해석하여 CSG 트리를 만들어 낸다. 마지막으로, 축약 모델들의 CSG 트리에 따라 부품의 병합체 모델의 위상 요소들 중 해석 모델의 구성을 위해 살아 남아야 할 요소들을 선택하여 표시해 둔다. 선택하는 과정은 김성환⁽³⁰⁾의 불리안 작업에 소개된 선택 알고리즘을 그대로 사용하면 된다.

예를 들어, Fig. 9의 간단한 부품 모델인 경우는 특

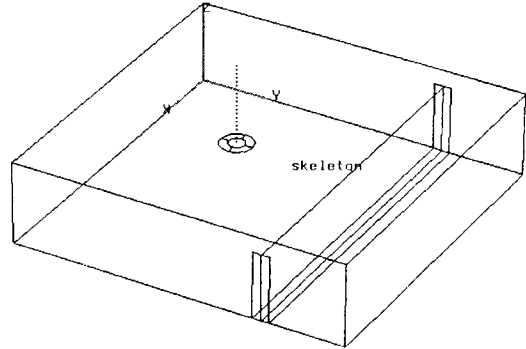


Fig. 10. Selection of topological entities to build the abstract model.

징 형상의 유형 및 생성 순서를 바탕으로(base_sheet+rib_sheet)+boss_wire에 해당하는 CSG 트리를 구성하게 된다. 이 CSG 트리를 따라 살아 남는 위상 요소들을 선택하여 나타낸 것이 Fig. 10이다. 선택(selection)에 대한 보다 상세한 설명은 참고 문헌⁽³⁰⁾에 소개되어 있다. 단, 여기서 주의해야 할 점은 비록 화면상에는 해석을 위한 모델이 완성된 듯이 나타나 있으나, 사실은 보이지 않는 위상 요소들이 그대로 남아 있다는 것이다.

5.2 해석용 축약 모델 및 메쉬의 생성

선택 과정이 끝난 후 부품의 병합체 모델의 각 꼭지점, 모서리, 면, 영역들은 각각 alive와 dead의 셋말로 표시되어 있다. 해석용 유한 요소를 만들기 위해서는 dead로 표시된 불필요한 위상 요소들이 없는 새로운 모델이 만들어져야 한다. 이 모델을 만들어 내는 방법은 오일러 작업(Euler operation)들을 사용하여 alive로 표시된 위상 요소들만으로 이루어진 모델을 새로이 만들수도 있지만, 그보다는 일반 병합체 모델을 복사한 다음 복사된 모델의 위상 요소들 중 dead로 표시된 것들을 오일러 작업을 통해 없애 나가는 방법이 훨씬 쉽다. 따라서 본 시스템에서는 후자의 방법을 사용하여 해석용 축약 모델을 만들었다.

즉, 주어진 부품의 병합체 모델을 하나 복사하여 복사된 모델의 위상 요소들 중 dead로 표시된 요소들을 찾아낸 후, 이들을 면, 모서리, 꼭지점의 순서로 제거해 나간다. 이때 사용하는 오일러 작업은 면을 소거할 때는 KFMC와 KFR을, 모서리를 소거할 때는 KEV, KEC, KEMS을, 꼭지점을 소거할 때는 KVS를 사용하도록 되어 있다.⁽²⁸⁾ 다음, 불필요한 위상 요소들을 제거하여 모델을 깨끗하게 정리한다.

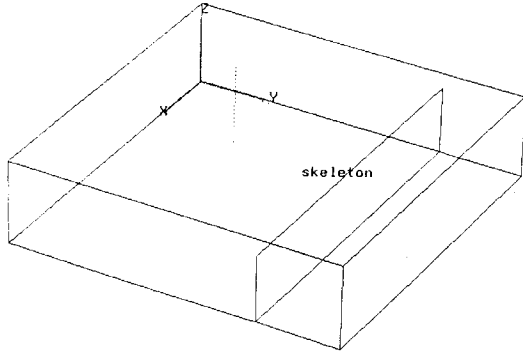


Fig. 11. Extraction of the abstract model from the merged-set of part.

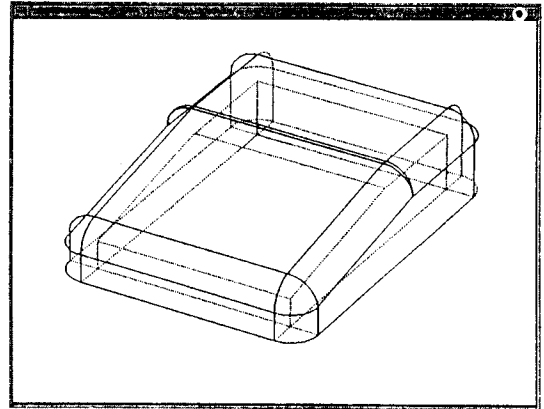


Fig. 13. Transform the sheet model to a solid.

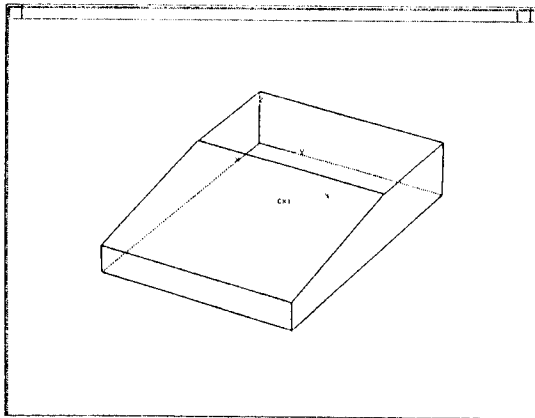


Fig. 12. Create a sheet model of the inner wall of a mouse.

여기에서는 같은 평면상에 있는 두 이웃한 면과 같은 직선상에 있는 이웃한 두 모서리 등을 하나로 합침으로서 모델을 간소화시킨다. Fig. 10에 대해 위 과정을 적용시켜 얻은 축약 모델이 Fig. 11에 나타나 있다.

해석용 축약 모델이 만들어지면 그 모델의 각 면들에 대해 삼각형 셀 메쉬를 만드는 작업을 한다. 이때 고려해야 할 점은 C-FLOW에서는 가급적 일정한 크기의 유한 요소를 원하며, 다른 면과 만나는 모서리 부분에서는 절점(node)이 반드시 일치해야 한다는 것이다. 유한 요소를 생성시켜 주는 알고리즘은 이미 많이 발표되어 있으므로 이 가운데 하나를 사용하면 되나, 본 시스템에서는 김백규⁽²⁵⁾가 제시한 옥트리(octree)를 이용한 박판 모델의 유한 요소 자동 생성 알고리즘으로 셀 유한 요소를 만들도록 하였다. 이에 대한 적용 예는 다음 장에서 보여 주도록

하겠다.

본 시스템에 대한 적용 예로써 컴퓨터의 그래픽 입력 장치로 널리 쓰이는 마우스를 대상으로 선택하여 보았다. 먼저 마우스의 주 형상을 비다양체 모델링 시스템을 사용하여 모델링한 후, 특징 형상 모델링 셸로 들어가서 각종 특징 형상들을 추가시켜 최종 제품 형상을 만들어 낸다. 다음, 특징 형상 변환 셸로 들어가서 해석에 필요한 C-FLOW용 축약 모델을 추출해 내고, 최종 메쉬를 만들어 내는 과정을 소개하도록 하겠다.

Fig. 12에서는 비다양체 형상 모델러의 박판 모델링 기능들을 사용하여 마우스의 내측 벽에 대한 박판 모델을 생성시킨 결과이다.

Fig. 13은 박판 모델의 솔리드로의 자동 변환 기능을 사용하여 앞의 박판 모델을 두께만큼 밖으로 오프셋 시켜 솔리드를 생성시킨 결과이다.

Fig. 14는 특징 형상 모델링 셸에서 마우스의 주 형상 모델 위에 구멍에 해당하는 특징 형상을 만들어 넣은 결과이다. 이 시점에서 마우스 모델은 불리안 작업을 통해 이미 자신의 중립면을 지나는 박판 모델과 솔리드 모델이 병합되어서 존재하고 있다.

Fig. 15는 마우스의 조립을 위한 보스 특징 형상을 생성시킨 결과로서 보스들의 솔리드 모델과 박판 및 와이어프레임 두 가지 축약 모델이 마우스 모델에 불리안 작업을 통해 합쳐져 있다.

Fig. 16은 완성된 마우스에 대하여 시뮬 성형 해석을 위한 C-FLOW 해석용 축약 모델을 추출해 낸 모습이다.

Fig. 17은 해석용 축약 모델에 대하여 셀 메쉬를 생성시킨 모습이다.

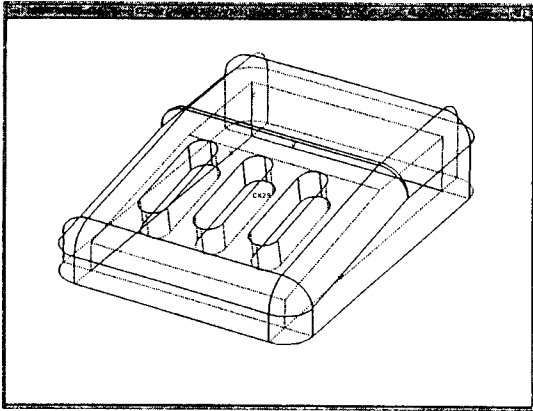


Fig. 14. Add three hole features to the mouse.

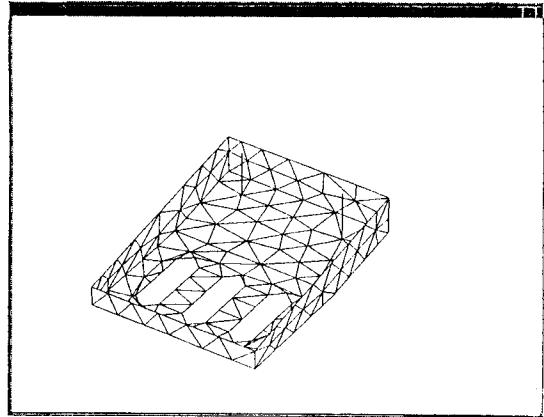


Fig. 17. Generate FEM meshes from the abstract model.

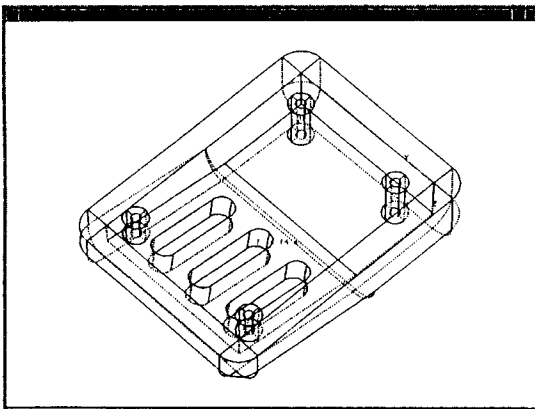


Fig. 15 Add four boss features to the mouse.

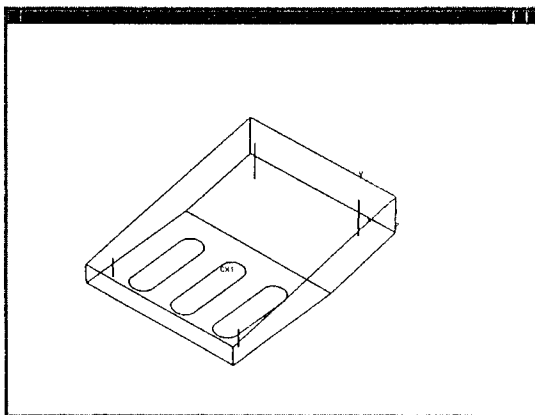


Fig. 16. Abstract model for C-FLOW

7. 결 론

사출 성형 해석을 위한 현 CAE 시스템이 요구하

는 기하학적 모델은 사출품의 중립면을 지나는 박판 형상과 보스에 대한 와이어프레임의 조합으로 이루어진 축약 모델로서 해석을 행하고자 할 때에는 CAD 시스템에서 생성된 설계 결과인 솔리드 모델을 사용하지 못하고 다시 축약 모델을 모델링 해야 하는 번거로움이 있었다. 이러한 문제점을 해결하고 플라스틱 사출 성형 제품의 설계 및 해석을 위한 통합 환경을 제공하기 위하여 본 논문에서는 비다양체 형상 모델러를 바탕으로 한 특징 형상 기반 설계 시스템을 개발하였다.

본 시스템에서는 CAD와 CAE 시스템에서 사용되는 기하학적 모델들을 하나의 비다양체 자료 구조로 표현하고, 설계에 사용된 각 특징 형상들에 대한 솔리드 및 축약 모델과 이들의 불리안 작업으로 발생된 모든 위상 요소들과 그들의 연혁 정보들을 부품 데이터베이스내에 모두 저장함으로써, 설계 결과인 부품의 솔리드 형상과 해석에 필요한 축약 모델을 필요 시 즉각 제공해 줄 수 있도록 하였다. 또한 이러한 정보를 활용함으로써 기존의 솔리드 모델을 바탕으로 한 특징 형상 기반 모델러에서 구현하기 곤란했던 특징 형상의 즉각적인 삭제와 특징 형상들간의 상호 간섭에 대한 감지를 쉽게 구현할 수 있게 되었다. 나아가 본 시스템에서는 객체 지향 프로그래밍 기법을 사용하여 사용자가 원하는 특징 형상을 프로그램 코드의 변환이 없이 자유로이 추가시킬 수 있도록 하여 특징 형상 라이브러리의 확장을 손쉽게 하였다. 한편, 비다양체 형상 모델러에서는 얇은 두께의 사출 성형 제품을 편리하게 설계할 수 있는 박판 모델링 기능과 박판에서 솔리드로의 자동 변환

기능을 제공함으로써 사출품을 보다 쉽게 모델링할 수 있도록 하였다.

그러나 보다 완전한 통합 CAD/CAE 시스템이 되기 위해서는 먼저 게이트, 런너와 같은 수치 전달 시스템에 대한 특징 형상들이 추가되어야 하며, 주 형상에 대한 중립면 모델을 자동으로 추출하는 중립축 변환 기능이 추가되어야 한다. 또한, 변이 형상 (variational geometry)을 지원할 수 있도록 특징 형상의 기하학적 형상 및 위치와 특징 형상들간의 공간적인 관계를 규정하는 구속 조건을 바탕으로 한 설계 시스템을 구축할 필요가 있다. 나아가 현재는 시범적으로 C-FLOW에 대한 특징 형상 변환 셀이 개발되어 있으나 장치 CAE 뿐만 아니라 CAPP, CAM 등의 다양한 응용 영역으로 특징 형상 변환 셀을 확장시키고 그밖에 금형의 설계 및 해석 결과를 재설계에 반영시킬 수 있는 전문가 시스템 등과 연계시킴으로써 설계 및 생산을 동시에 지원할 수 있는 통합 CAD/CAE/CAM 시스템으로 발전시켜 나아가야 할 것이다.

참고문헌

1. Kim, S.G., *Knowledge-based Synthesis System for Injection Molding*, Ph.D. Thesis, MIT, 1985
2. Huh, Y.J., and Kim, S.G., "Ribber: A Knowledge-Based Synthesis System for Ribbed Injection Molded Parts," *Concurrent Product and Process Design*, Edited by Chao, N.H. and Lu, S.C.Y., The Winter Annual Meeting of the ASME, San Francisco, PED-Vol.36, pp.195-204, December 10-15, 1989
3. Ishii, K., Hornberger, L., Liou, M., "Compatibility-Based Design for Injection Molding," *Concurrent Product and Process Design, The Winter Annual Meeting of the ASME*, San Francisco, DE-Vol.21, PED-Vol.36, pp.153-160, December 10-15, 1989
4. Lee, S.H. and Lee, K., "An Integrated CAD System for Mold Design in Injection Molding Process," *Production Engineering Division, The Winter Annual Meeting of the ASME*, Chicago, PED-Vol.32, pp.257-271, 1988
5. Shin, K.H. and Lee, K., "Design of Side Cores of Injection Mold from Automatic Detection of Interference Faces," *Concurrent Engineering, The Winter Annual Meeting of the ASME*, Anaheim, CA, PED-Vol.59, pp.27-41, November 8-13, 1992
6. Wang, K.K., et.al, "Integration of CAD/CAM for Injection-Molded Plastic Parts," *CIMP Progress Report* No.13, 1987
7. Hieber, C.A. and Shen, S.F., "A Finite-Element/Finite-Difference Simulation of the Injection Molding Filling Process," *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol.7, pp.1-32, 1980
8. Lee, H.S., Sin, H.C., Kim, S.G., "Integrative Boundary Pressure Reflection Method for Injection Mold Filling," *Polymer Engineering and Science*, Vol.30, No.23, pp.1513-1522, 1990
9. "C-FLOW User's Guide," Advanced CAE Technology, Inc., 1989
10. Weiler, K., *Topological Structures for Geometric Modeling*, Ph.D. Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986
11. Gadh. R., Hall, M.A., Gursoz, E.L., Prinz, F.B., "Knowledge Driven Manufacturability Analysis from Feature-Based Representations," The Winter Annual Meeting of the ASME, San Francisco, DE-Vol. 21, PED-Vol.36, pp.21-34, December 10-15, 1989
12. Bernhardt, E.C., *CAE for Injection Molding*, Hanser Publisher, New York, 1983
13. 이상현, "사출 성형 제품의 설계 및 해석의 통합 환경을 제공하기 위한 특징 형상 기반 비다양체 모델링 시스템의 개발", 박사 학위 논문, 서울 대학교, 1993
14. Stroud, I., "Modeling with Degenerate Objects," *Computer Aided Design*, Vol.22, No.6, pp.344-351, 1990
15. Lee, K. and Kwon, B.W., "Efficient Modeling Method of Sheet Objects," *Computers in Engineering, Proceedings of the International Computers in Engineering Conference and Exhibit* Vol. 1, Published by ASME, New York, NY, USA, pp.437-446, 1992
16. Shah, J.J., "Assessment of Features Technology," *Computer-Aided Design*, Vol.23, No.5, pp.331-343, June 1991
17. Pratt, M.J., "Synthesis of an Optimal Approach to Form Feature Modeling," *Computers in Engineering, Proceedings of the 1988 ASME International Computers in Engineering Conference*, San Francisco, pp.263-274, July 31-August 14, 1988
18. Masuda, H., "Form-Feature Representation based on Non-manifold Geometric Modeling," *Proceedings of MICAD '92*, 1992
19. Rosen, D.W., Dixon, J.R., Poli, C., Dong, X., "Feature and Algorithm for Tooling Cost Evaluation in Injection Molding and Die Casting," *Proceeding of the 1992 ASME International Computers in Engineering Conference and Exposition*, San Francisco, California, pp.45-52, August 2-6, 1992
20. Rosen, D.W., Dixon, J.R., Dong, X., "A Methodology for Conversions of Feature-Based Representations"

tations," *Design Theory and Methodology*, ASME, DE-Vol.31, pp.45-51, 1991

21. Nackman, D.R. and Pizer, S.M., "Three-Dimensional Shape Description Using the Symmetric Axis Transform I: Theory," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, Vol. PAMI-7, pp.187-202, 1985

22. Hoffmann, C.M., "How to Construct the Skeleton of CSG Objects," *Technical Report CSD-TR-1014*, Computer Sciences Department, Purdue University, September 1990

23. Yu, X., Goldak, J.A., Dong, L., "Constructing 3-D Discrete Medial Axis," *Proceedings of Symposium on Solid Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*, pp.481-489, 1991

24. 이용구, "중립축 변환을 이용한 셀 유한 요소 생성", 석사 학위 논문, 서울 대학교, 1994

25. Hall, M.A., Sudhalkar, A.M., Gadh, R., Gursoz, E.L., Prinz, F.B., "Feature Abstraction in Knowledge-Based Critique of Designs," *Issues in Design/Manufacture Integration American Society of Mechanical Engineers, Design Engineering Division(Publication)* DE-Vol.29, Published by ASME, New York, NY, USA, pp.43-49, 1990

26. Choi, Y., *Vertex-based Boundary Representation of Non-manifold Geometric Models*, Ph.D. Thesis, Carnegie Mellon Univ., August 1989

27. Yamaguchi, Y. and Kimura, F., "Nonmanifold Topology Based on Coupling Entities," *IEEE Computer Graphics and Applications*, Vol.15, No.1, pp. 42-50, January 1995

28. 이상현, 이진우 "비다양체 형상 모델링을 위한 간결한 경계 표현 및 확장된 오일러 작업자", 한국 CAD/CAM 학회지, Vol.1, No.1, pp.1-19, March 1996

29. Crocker, G.A., and Reinke, W.F., "An Editable Non-manifold Boundary Representation," *IEEE Com-*

puter Graphics & Applications, Vol.11, No.2, pp.39-51, March 1991

30. 김성환, 이진우, 김영진, "비다양체 모델을 수용하는 CAD 시스템 커널을 위한 불리안 조작의 개발", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, Vol.1, No.1, pp.20-32, March 1996

31. Kim, H.S., Ko, H., Lee, K., "Incremental Feature-based Modeling," *The Second ACM/SIGGRAPH Symposium on Solid Modeling and Applications*, Montreal, 1993

32. 김백규, "Octree를 이용한 박판 모델의 유한 요소 자동 생성", 석사 학위 논문, 서울 대학교, 1994



이 상 현

1986년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1988년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1993년 서울대학교 기계설계학과 박사
 1993년~1995년 (주)신도리코 기술연구소
 1996년 고등기술연구원 생산기술연구실
 현 재 국민대학교 자동차공학과 전임강사
 관심분야: Non-manifold Modeling, Solid Modeling, Rapid Prototyping, Automobile Body Engineering



이 진 우

1978년 서울대학교 기계공학과 학사
 1981년 미국 MIT 공학석사
 1984년 미국 MIT 공학박사
 1984년~1986년 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수
 1986년~현재 서울대학교 기계설계학과 교수
 관심분야: Computer aided geometric design, NC tool path generation and verification, Solid modeling, Rapid prototyping