

〈論 文〉

하향식 설계방식을 지원하는 새로운 개념의 CAD 시스템

김성환* · 이건우**

(1994년 10월 8일 접수)

CAD System of New Concept to Support Top-Down Approach in Design

Sung-Hwan Kim and Kun-Woo Lee

Key Words : Assembly Modeling(조립체 모델링), Top-Down Modeling(하향식 모델링), Conceptual Model(개념모델), Two-Level Feature(2층 특징형상), Geometric Constraint(형상구속조건), Non-Manifold(비다양체)

Abstract

In the process of mechanical assembly design, assembly modeling systems have been used mainly for the design verification before manufacturing by enabling to check the interference and/or the dynamic and kinematic performance. However, the conventional assembly modeling systems have a shortcoming that they can not be used in the initial design stage but can be used only after the design is fully completed. In other words conventional assembly modeling systems provide bottom-up modeling which means that the detailed modeling of components must precede the definition of relationships between them. To resolve this problem, an assembly modeling system is proposed to provide a top-down modeling environment in which components and assembly can be modeled simultaneously. To this end, an assembly data structure suitable for top-down assembly modeling has been established. Feature Positioning Module(FPM) using geometric constraints has been also developed. The Selective Solving Method proposed for FPM is based on the priority between the constraint equations and enables the designer's intent expressed by geometric constraints to be maintained throughout the whole modeling process. Finally, the feature based modeling technique using two-level features has been developed. Two-level features include an abstract model and a detailed model in a merged form in non-manifold data frame.

1. 서 론

기계부품을 설계함에 있어 기존의 CAD 시스템이 지원하고 있는 기능들은 삼차원 모델링된 단일 물체에 대한 물성치(mass property)의 계산, FEM 해석을 위한 유한요소의 자동생성, 곡면에 대한 NC

공구경로(tool path)의 계산, 부품의 생산을 위한 가공정보 도출 등이 있다. 한편 이렇게 설계된 부품들은 조립되어 결국 기계 조립체를 이루게 되는데 이때 생산 이전에 미리 작동간섭 검사나 동역학 또는 기구학적인 해석을 행하기 위해서는 조립체 모델링 시스템을 사용하여 이미 모델링된 부품들에 조립위치와 부품사이의 결합관계를 부여하여 조립체 모델을 만들고 이를 해석프로그램의 입력모델로 사용하게 된다. 이와 같은 기능들은 과거의 번거롭

*정회원, 대우공업전문대학 기계과

**정회원, 서울대학교 기계설계학과

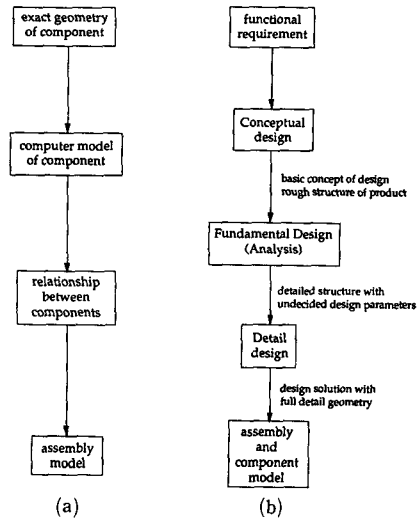
저나 거의 불가능하였던 많은 수작업들을 경감시켜 주는 효과적인 설계보조기능을 제공함으로써 설계 업무를 보다 효율적으로 진행할 수 있도록 도움을 주고 있다.

이러한 발전은 물체의 구상에서 설계, 해석 및 생산에 이르는 과정중 가장 큰 비중을 가지는 설계 과정을 자동화시켜줌으로써 제품개발에 소요되는 시간과 노력을 절감시켜 생산성을 크게 향상시켜 줄 것으로 기대했으나 현재의 실정은 기대했던 만큼의 수준에는 미치지 못하고 있다. 이러한 문제는 기존의 조립체 모델링 시스템이 가지는 다음과 같은 제약에서 주로 기인된다.

Fig. 1의 (a)는 기존의 CAD 시스템에서 조립체를 모델링하는 과정을 보여준다. 이 과정은 앞서 설명한 바와 같이 이미 모델링된 정확한 형상의 부품모델들이 있을 때 이를 사용하여 조립체 모델을 생성하는 상향(bottom-up)설계의 과정이다. 반면 실제의 설계과정은 (b)와 같이 먼저 주요하고 특징적인 대략형상으로부터 상세한 부분으로 옮겨가면서 최종적으로 조립체와 함께 부품의 형상이 얻어지는 하향(top-down) 설계방식이다.⁽¹⁾ 따라서 기존 조립체 모델링 시스템의 사용은 설계가 모두 완료되어 부품의 상세한 형상이 모두 얻어졌을 때에만 가능해지므로 설계 초기단계에서는 거의 도움을 주지 못하게 된다.

그러므로 설계자에게 보다 실질적인 도움을 주기 위해서는 초기 설계단계에서 설계개념과 대략적인 형상만 정해져 있을 때에도 조립체의 컴퓨터 모델을 생성할 수 있는 조립체 모델링 시스템이 필요하다. 설계개념과 대략적인 형상만으로 조립체를 모델링하려면 조립체 모델링 시스템이 하향 설계방식을 따라야 하는데,^(2,3) 본 연구의 목적은 이런 요구에 부응하는 조립체 모델링 시스템을 개발하는데 있다.

기존의 CAD 시스템에서 사용되는 기법으로 하향 설계방식을 수용하려면 여러 가지 문제점들이 있다. 이러한 문제점들은 주로 기존의 CAD 시스템이 다룰 수 있는 정보의 종류가 제한되어 있기 때문에 생기는 것들인데 기존의 CAD 시스템이 다룰 수 있는 정보는 정확하고(precise) 상세한(detail) 형상을 가지는 최종 물체의 형상으로 국한되어 있다. 따라서 하향 설계방식의 모델링 시스템을 구현하기 위해서는 추가로 만족되어야 하는 요구기능들이 있으며 이것은 다음과 같이 요약될 수 있다.



(a) Assembly modeling process in conventional CAD system
(b) Actual design process

Fig. 1 Comparison of two assembly modeling processes

(1) 개념모델링 단계를 지원할 수 있어야 한다.

개념모델링 단계에서는 실제물의 세부나 정확한 크기 등 자세한 것들은 가능한 한 결정이 유보되면서 주요 설계개념만을 구현하게 되며 따라서 이때 다루어져야 하는 정보들은 정확한 크기나 형상이 아직 갖추어지지 않은 형상요소(geometric entity)나 요구기능을 충족시키기 위한 제한조건(constraint) 등이 된다. 특히 대략적인 형태는 주로 설계물을 축약된 형태(abstract configuration)로 표현한 것인데 예를 들면 축(shaft)은 직선으로, 얇은 물체 부분은 면으로 나타내는 것 등이다. 한편 이것들은 부피를 가지는 솔리드(solid) 물체와 혼용 사용되어 개념모델을 나타내기도 한다. 하향 설계방식의 모델링과정을 지원하려면 이러한 개념모델을 바탕으로 세부모델링이 진행되어야 하므로 개념모델을 명확히 입력받고 표현할 수 있는 방법이 필요하다.

(2) 형상정보 이외의 정보를 사용할 수 있어야 한다.

개념모델의 생성시에는 대략적인 형태 외에도 설계의 기본방향, 즉 설계의도가 결정되는데 이는 전체 모델링 과정중에 계속 유지되고 충족되어야 한다. 이는 세부 모델링 과정중 계속 참조되어야 하며 따라서 형상정보만으로 표현되지 않는 개념모델링의 결과를 정보화할 수 있는 시스템이 되어야 한다.

(3) 조립체와 부품이 동시에 설계되어야 한다.
 기존 CAD 시스템에서 조립체를 모델링하려면 조립체를 구성할 부품들이 먼저 모델링되어야 한다. 하지만 하향설계방식에서는 조립체의 모델링 결과로 각 부품이 얻어지는 것이지 부품을 먼저 모델링할 수 없다. 따라서 하향 설계방식을 구현하려면 조립체의 요구기능을 구현하기 위한 기능형상(functional feature)들을 먼저 만들고 이들 기능형상들로 이루어지는 부품이 나중에 설계되어야 한다. 예를 들어 조립체내에 축(shaft) 요소를 위치시키고자 하면 그 축을 지지하는 구멍(hole)이 필요하다. 이때 하향방식이 되려면 구멍을 갖는 지지대 보다 구멍의 존재가 먼저 모델링되고 그 위치에 구멍을 갖는 지지대가 후에 모델링될 수 있어야 한다.

(4) 모델간의 일관성(consistency)이 유지되어야 한다.

모델링이 개념단계에서 세부단계로 진행될 때, 개념단계에서 생성된 축약모델은 점차로 상세한 형태를 갖게 된다. 이는 모델이 축약모델에서 상세모델이라는 다른 계층(level)의 모델로 변환되어야 한다는 것을 의미한다. 따라서 시스템은 여러 계층의 모델을 통합된 자료구조를 통해 표현해야 한다.

2. 시스템의 개념 및 특성

하향 설계방식의 조립체 모델링 시스템을 구축하기 위해 필요한 요구조건은 앞서 지적한 바와 같이 개념 모델링에서 얻어지는 축약모델(abstract model)과 세부모델링에서 얻어지는 형상모델을 서로 일관성이 유지되도록 통합환경으로 표현할 수 있어야 한다는 것과 주어진 설계자의 의도가 모델링과정에서 반영될 수 있어야 한다는 것으로 요약될 수 있다.

이러한 요구조건을 충족시키기 위한 시스템의 기본 개념이 Fig. 2에 나타나 있다. 그림에서 볼 수 있는 바와 같이 최종 조립체를 설계하기 위해 사용자는 먼저 개념설계 단계에서 축약된 형태를 구상하고 모델링하게 된다. 이때에는 볼트구멍이 그것이 속할 브래킷(bracket)보다 먼저 모델링될 수 있는 등 사용자의 편의대로 모델링이 진행되며 만들어진 축약모델의 축지름이나 벽두께 등 상세한 모델정보는 아직 정해지지 않는다. 한편 이러한 개념모델을 생성할 때 브래킷이나 볼트구멍 등의 형상요소간에 만족되어야 할 크기나 위치의 관계가 설계의도로부터 발생되므로 시스템은 이를 형상구속조건의 형태로 입력받고, 이러한 설계의도도 개념모델의 구성요소중의 하나가 된다.

일단 이러한 개념모델이 완성되면 이것은 축의 지름 등과 같은 상세한 설계변수는 없지만 이것만 가지고도 기구학적 특성은 충분히 파악할 수 있으므로 여기서 모델이 검증될 수 있다. 만일 조립체가 복잡해지면 해석을 위해서는 ADAMS⁽⁴⁾나 DADS⁽⁵⁾와 같은 상용시스템을 사용하여 검증하는데, 이들 시스템이 요구하는 링크 및 조인트의 정보를 개념모델이 모두 포함하고 있으므로 이들 시스템을 위한 전처리기(preprocessor)가 있다면 복잡한 조립체의 해석도 가능하게 될 것이다.

개념모델의 타당성이 검증되면 설계자는 이를 바탕으로 세부모델링을 진행한다. 이때는 아직 그 결정이 유보되었던 축의 지름과 브래킷의 두께와 같은 설계변수들을 정해 축약모델을 상세모델(detail model)로 바꾸어 최종설계 결과물체를 얻어내게 된다.

한편 설계물의 만족여부에 따라 적절한 단계로 되돌아가 모델을 수정하여야 하는데 이때 형상구속조건으로 표현된 특징형상 사이의 관계가 항상 만

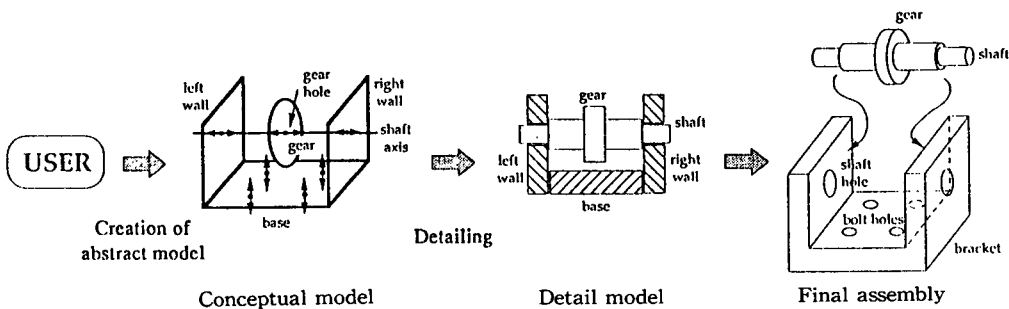


Fig. 2 Basic concept of the system

족되도록 시스템은 이를 계속 관리한다.

위와 같은 설계과정을 수용하기 위해 시스템이 가져야 할 형태적 특성을 요약하면 다음과 같다.

2.1 비다양체를 기반으로 하는 모델링 시스템

기존의 CAD 시스템이 다루는 다양체(2-manifold) 모델은 실제로 존재할 수 있는 완전한 물체의 형상이며 보통 솔리드모델이라 불린다. 따라서 이런 다양체를 기반으로 하는 시스템들은 기본적으로 설계의 최종결과만을 수용할 수 있다. 이에 비해 비다양체(non-manifold) 모델^(6~8)은 다양체모델뿐만 아니라 와이어프레임(wireframe) 모델과 곡면(surface) 모델, 그리고 이들이 혼합되어 있는 형태의 모델까지도 표현이 가능하다. 한편 위의 예에서 보인 바와 같이 하향 설계방식의 개념설계 단계에서 나타나는 축약모델은 선이나 면들로 구성되는 전형적인 비다양체모델이다. 따라서 비다양체모델링 시스템을 사용함으로써 축약모델과 상세모델이라는 다층모델을 통일된 방법으로 다룰 수 있고 이들 사이의 일관성을 유지할 수 있다.

2.2 특징형상을 사용하는 모델링 시스템

하향 설계방식의 모델링 시스템이 특징형상(feature)을 기반으로 하여야 하는 첫번째 이유는 축약모델에 의미를 부여할 수 있도록 하기 위함이다. 개념모델링에서 작성되는 축약모델은 원래의 모델을 간략화한 것이기 때문에 그것이 가지고 있는 단순한 형태에 덧붙여서 여러 의미를 함축하게 된다. 앞의 예에서 설계자는 축(shaft)을 모델링할 때 그 존재를 표시하기 위한 축약모델을 직선의 간단한 형태로 표현하였다. 하지만 이것은 세부모델링 과정에서 부피를 가지는 원통형의 물체로 바뀌어야 할 뿐만 아니라 같은 지름을 갖는 구멍(hole)과 결합될 수도 있고 회전상대운동을 가질 수도 있는 등 여러 의미를 내포하게 된다. 이러한 사실들을 시스템이 인식하도록 하기 위해 특징형상의 개념을 사용한다. 특징형상을 사용하는 두번째 이유는 조립체와 부품이 동시에 설계되게 하기 위함이다. 조립체와 부품이 동시에 설계되려면 모델링이 부품단위가 아닌 기능형상 단위로 이루어져야 한다. 이때 기능형상은 그것이 어느 부품에 속하는가 보다 어떤 기능을 하는가에 따라 선택된다. 따라서 특징형상이 기능형상을 대표하게 하면 기능형상 단위의 모델링을 가능하게 할 수 있다.

2.3 설계의도를 유지 관리하는 시스템

개념모델링의 결과인 개념모델은 최종 모델링 결과의 형상을 암시하는 축약모델과 형상요소만으로는 표현되지 않는 설계의도로 이루어진다. 이때 세부모델링 결과가 원래 의도했던 설계가 되기 위해서는 사용자가 가지고 있는 설계의도가 시스템에 의해 관리(design intent maintenance system)되어 항상 정당하게 만족되어지도록 하여 줄 필요가 있다. 본 논문에서는 다음과 같은 설계의도를 수용한다.

- 축약모델로 암시된 상세모델의 형태
- 각 특징형상 사이에 만족되어야 할 크기와 위치의 구속조건
- 각 부품사이의 상대운동

관리하여야 할 첫번째 설계의도는 물체의 대략적 형태이다. 사용자는 이미 개념모델링 단계에서 축약모델로 이를 표현하는데 이때 시스템의 역할은 이것이 원래의 의도대로 상세화되어 가도록 도와주는 것이다. 이를 위하여 시스템은 그 안에 상세화 방법에 관한 정보가 포함된 특징형상을 사용한다. 즉, 설계자가 특징형상을 사용하여 축약모델을 작성할 때 특징형상의 선택을 통해 이미 상세형상에 대한 설계의도를 시스템에게 제공한 것이 된다.

두번째 고려되는 설계의도는 특징형상으로 표현되는 형상요소들 간의 구속관계이다. 축약모델을 통하여 조립체의 대략적인 형태가 정해졌을 때 이들의 크기나 위치에는 만족되어야 할 성질이 생기게 된다. 이것은 세부모델링이 진행될 때에도 만족되어야 하지만 특히 모델에 수정이 가해질 때에도 항상 만족되어야 하는 성질이다. 앞의 예에서는 볼트구멍에 대한 기어와 축의 상대위치와 같은 주요 성질들은 사용자로부터 형상구속조건(geometric constraint)의 형태로 입력받아 특징형상 위치계산 모듈을 통해 항상 만족되도록 유지 관리하여준다.

마지막으로 고려되는 설계의도는 물체간의 상대운동이다. 조립체를 모델링할 때 설계자는 요구기능을 만족시키기 위해 부품간의 특정한 상대운동을 원하게 된다. 따라서 원하는 상대운동을 설계의도로 간주할 수 있는데 설계자는 이것을 실현시키기 위해 형상요소들의 결합관계를 부여하게 된다. 앞의 기어-축 조립체의 예에서는 애초에 설계자가 브레이크와 축사이에 회전운동만이 있기를 원한다는 설계의도를 주고 이것을 실현시키기 위하여 개념모델

을 생성할 때 축과 브래킷의 구멍사이에 2개의 축-구멍관계라는 요소결합(element connection)을 모델링하였다. 하지만 부품간에 원하는 상대운동을 실현시키기 위해 사용자가 부여한 요소결합이 항상 충분하거나 적절한 것은 아니다. 위의 예에서는 요소결합만으로는 축방향의 병진운동도 가능하므로 아직 설계의도가 만족되지 않고 있는데 이런 것을 감시하는 것이 시스템의 역할이다. 즉 시스템은 운동해석(motion analysis) 기법을 사용하여 부품간의 상대운동이 요소결합을 통해 구현되었는지를 판단하며 그렇지 못한 경우에는 추가적인 작업이 필요함을 사용자에게 알려주게 된다.

3. 조립체 자료구조

본 연구에서 사용하는 조립체 자료구조가 가져야 하는 중요한 특성은 하향 모델링과정을 잘 지원할 수 있도록 설계자가 개념모델을 만들 때 제공한 여러 가지 정보를 적절하게 저장하고 그 정보가 상세 모델을 작성할 때나 모델을 수정할 때 사용될 수 있도록 하여야 할뿐 아니라 결과조립체를 표현하기 위한 부품정보와 이 들간의 상대위치 및 조인트 정보도 포함해야 한다는 것이다. Fig. 3은 본 연구에서 사용하는 조립체 자료구조를 보여주고 있다.

형상요소(shape element)는 사용자가 선택한 각각의 특징형상(form feature)을 저장하는 곳으로

서, 본 시스템의 특징을 결정하는 가장 중요한 자료개체이다. 특징형상은 그 자체에 축약모델과 상세모델을 모두 포함하는 다층구조로 되어 있고 또 어떤 방법으로 상세화되어야 할지를 모두 포함하고 있어 설계자는 형상의 선택만으로 자신의 설계의도를 시스템에게 알려줄 수 있다. 또한 특징형상들의 크기와 위치를 정하기 위해 사용자가 정해준형상구속조건(geometric constraint)들도 형상요소 내에 포함되어 저장되어진다. 이는 처음 축약모델이 만들어질 때나 혹은 모델이 수정되어질 때 특징형상의 위치를 결정하기 위한 정보로 사용되어 진다. 한편 형상구속조건은 설계변수 리스트(design parameter list)를 참조할 수 있는데 설계변수 리스트란 조립체에 대한 주요 설계변수들의 이름과 수치를 저장한 데이터이다. Fig. 4는 형상요소 내에 저장되어지는 정보를 표시하고 있다. 한편 본 연구에서 채택한 다층 특징형상의 종류는 Fig. 5에 나타나 있는 5가지이며 대부분의 간단한 기계형상들은 이들 특징형상으로 표현이 가능하다. 이러한 형상요소들은 처음 생성될 때 그것이 어느 부품에 속하게 될지 정해지지 않은채 조립체에 속하게 되는 것이 보통이므로 Fig. 3에서와 같이 연결리스트(linked list)로 조립체에 저장되었다가 설계의 진행에 따라 소속될 부품이 정해지면 해당 부품으로의 포인터를 가지게 된다. 따라서 하나의 부품을 가리키는 형상요소의 수는 여러 개가 될 수 있다.

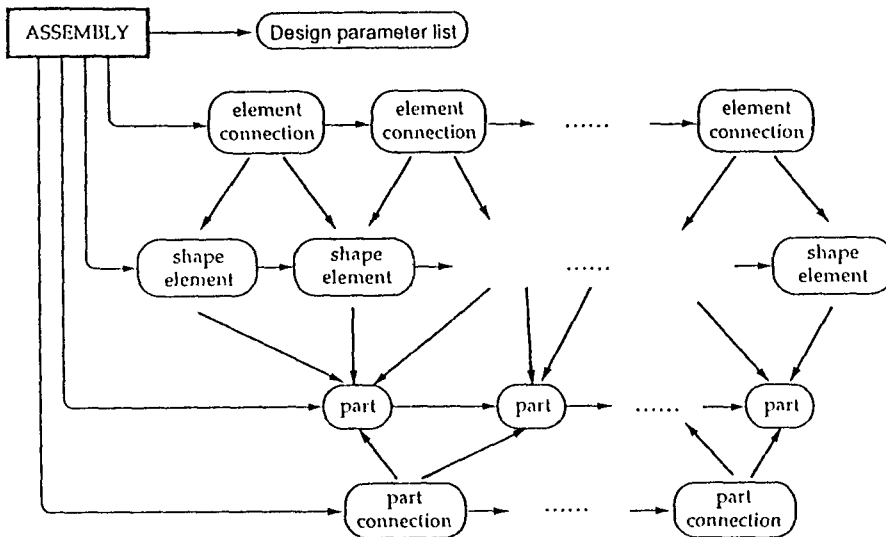


Fig. 3 Assembly data structure

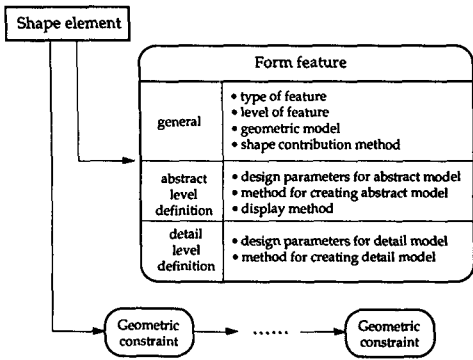


Fig. 4 Contents of shape element

Fig. 3의 부품(part)은 그 존재사실을 사용자가 입력하여야 하는데 이는 어떤 형상요소들이 하나의 부품을 구성하게 되는가를 나타낸다. 따라서 이곳에는 부품의 이름을 저장한다. 그리고 설계가 완성 되었을 때 부품의 형상모델은 형상요소 모델들 간의 불리안 작업으로 얻어지게 된다.

다음으로, 설계자가 의도하는 부품사이의 상대운 동은 부품결합(part connection)에 저장된다. 이것은 설계자가 기능구현을 위하여 필요한 설계의도를 미리 선언해 놓은 것이며 설계자가 이를 구현하기 위하여 입력하게 되는 특징형상사이의 결합관계는 요소결합(element connection)에 저장된다. 앞의 예에서는 브래킷과 축 사이에 회전운동만이 있어야 한다는 사용자의 의도는 브래킷과 축을 가리키는 부품결합에 저장되어지고, 축 형상요소와 브래킷의 구성요소가 되는 구멍 형상요소 사이에는 축 결합

Feature type	Abstract geometry level	Detail geometry level
Through hole	 none	 radius
Shaft	 length	 radius
Rectangular wall	 width depth	 thickness
Circular wall	 radius	 thickness
Cylindrical wall	 radius height	 thickness

Fig. 5 Form features in two levels

이라는 요소결합이 저장되어진다. 시스템은 이러한 정보를 가지고 모델링과정이 적절하게 진행되어 가고 있는지를 감시할 수 있다.

한편 본 연구의 자료구조의 특징은 형상요소와 요소결합, 부품과 부품결합의 자료객체들을 그래프(graph) 구조내에 병렬방식으로 저장한다는 것이다. 조립체 자료구조에 관한 기존의 연구자로는 Lieberman과 Wesley,⁽⁹⁾ Eastman,⁽¹⁰⁾ Tilove⁽¹¹⁾ 및

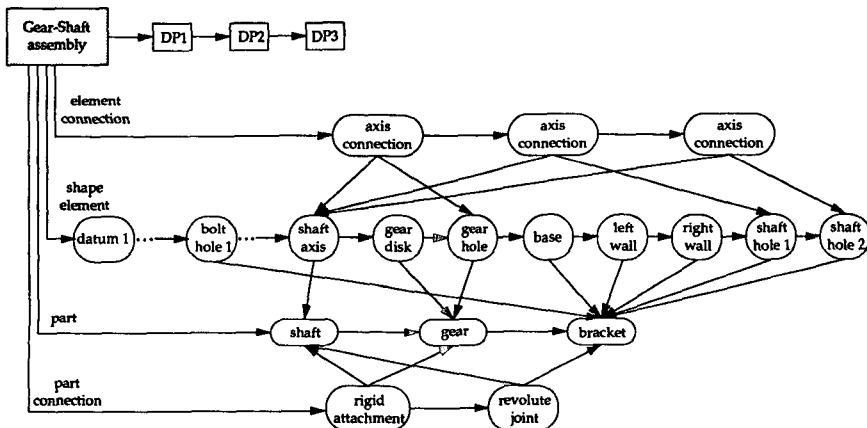


Fig. 6 Assembly data structure of gear-shaft assembly

이진우 등⁽¹²⁾을 들 수 있는데, 본 자료구조의 병렬 저장방식은 이들이 조립체를 단순 그래프구조 또는 계층적(hierarchical)구조로 표현하는 것과는 구별된다. 기존의 연구들에서는 조립체의 모델링을 상향 설계방식으로 하게 되므로 이미 부품모델들이 먼저 존재하고 이들의 연관관계를 나중에 모델링하게 된다. 이 경우 자료객체들의 결정순서가 정해지게 되고 따라서 조립체의 저장은 그래프 구조 또는 계층적 구조가 적합하다. 하지만 본 연구에서는 기존의 연구들과 달리 하향 설계방식으로 조립체가 모델링되므로 자료객체들이 결정되는 순서가 일정치 않게 된다. 예를 들어 부품이 존재하기도 전에 부품에 속할 형상요소와 그들 사이의 요소결합이 먼저 정해질 수도 있고, 반대로 부품이 그에 속할 형상요소가 전혀 없는 상태에서 먼저 선언될 수도 있다. 이러한 모델링과정을 수용하기 위해 조립체

자료구조는 각 저장객체들이 만들어질 때마다 조립체에 속하는 연결리스트(linked list)로 등록이 되고 이들 사이에 연관관계를 포인터로 연결시켜주는 병렬저장의 형태가 된다. 한편 Fig. 2의 축약모델이 완성되었을 때의 자료구조는 Fig. 6과 같이 된다.

4. 개념설계

4.1 개념모델의 작성과정

하향 설계방식의 조립체 모델링에서 가장 먼저 수행되어야 하는 작업이 개념모델을 작성하는 것이다. 그런데 개념모델의 구성요소는 특정형상들의 집합인 축약모델과 이들의 위치관계를 규정하는 형상구속조건, 그리고 부품사이의 원하는 상대운동과 이를 구현하기 위한 특정형상들 간의 요소결합관계

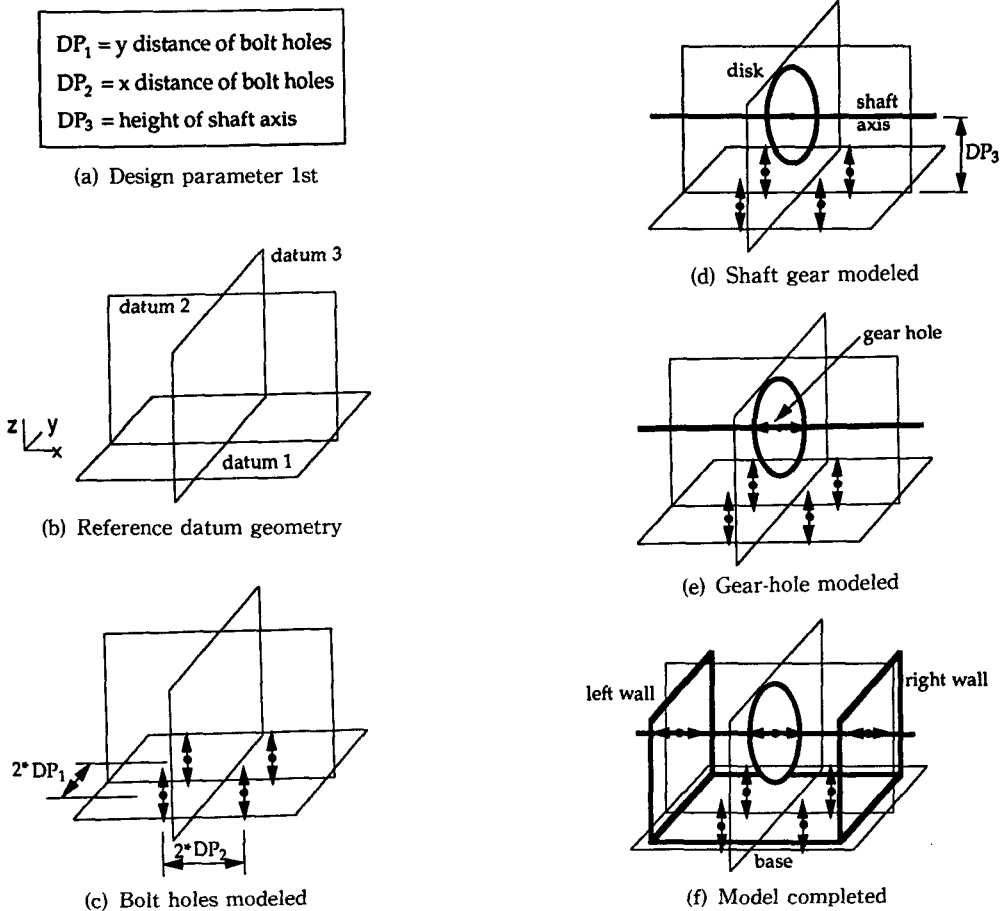


Fig. 7 Construction of conceptual model of gearshaft assembly

이므로 시스템은 사용자로부터 이들을 입력받아 처리함으로써 개념모델을 작성해 가게 된다. 개념모델의 작성에서 가장 근간이 되는 것은 특징형상을 선택하여 원하는 곳에 위치시키는 작업이다. 특징형상이 하나 인스턴스되었을 때 그 안에 저장되어야 하는 정보들 중 사용자에게 의해 입력되어야 하는 정보는 특징형상의 종류와 축약모델에 대한 치수 등의 매개변수의 값이다. 이외의 다른 정보들은 미리 저장되어 있거나 시스템에 의해 정해지는 것들이다. 필요정보가 입력되면 시스템은 자기가 정한 임의의 위치에, 주어진 매개변수 값을 갖는 축약모델을 만들어 독립된 윈도우에 이를 보여주며, 이를 위치시키기 위한 형상구속조건의 입력을 기다리게 된다. 형상구속조건이 입력되면 시스템은 이를 풀어 특징형상을 원하는 위치로 이동시키게 된다.

Fig. 7은 기어-축 조립체의 개념모델 생성의 예를 보여주고 있다. 이 개념모델은 기준평면(datum plane), 볼트구멍, 축과 기어, 기어구멍 및 바닥과

양쪽 벽의 순서로 모델링 되었다. 한편 모델링과정에서 3개의 설계변수가 정의되었는데 이들은 형상구속조건에서 참조된다. 즉, DP_1 과 DP_2 는 볼트구멍의 위치를 정할 때 datum 2와 datum 3로부터의 거리로 사용된다. 이것은 볼트구멍들이 설계 사양에 맞는 간격을 가져야 하고 Fig. 7의 (c)에서와 같이 기준형상 datum 2와 datum 3에 대해 대칭으로 놓여져야 한다는 조건을 만족시켜 준다. 또한 다른 구멍의 위치에는 변화없이 하나의 구멍위치만 옮기는 등의 원치 않는 모델링 변경을 막아주는 역할도 한다. 그리고 만일 설계사양이 바뀌어 볼트구멍간의 간격이 변하게 되면 설계변수 리스트에 저장된 값만을 바꿈으로써 그 변화를 자동으로 전파시켜 원하는 변화형상을 손쉽게 얻을 수 있다. 한편 사용자는 형상요소 모델링 중 편리한 순간에 부품정보, 요소결합 및 부품결합 등을 입력하여 개념모델을 완성하게 되고 그 자료구조는 Fig. 6에서 보인 바 있다.

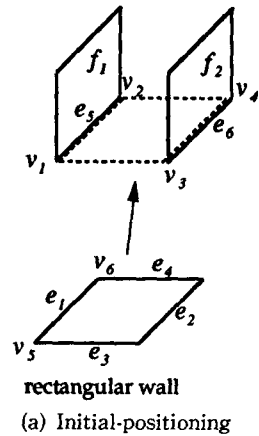
Datum 1 Datum 2 Datum 3	Position and orientation w.r.t. assembly model coordinate
Bolt hole 1 Bolt hole 2 Bolt hole 3 Bolt hole 4	VERTEX_ON_GPFACE(datum1) SEGE_RIGHT_GPFACE(datum1) VERTEX_DIST_GPFACE(datum2, DP1) VERTEX_DIST_GPFACE(datum3, DP2)
Shaft axis	VERTEX_ON_GPFACE(datum3) SEGE_ON_GPFACE(datum2) SEGE_PARALLEL_DIST_GPFACE(datum1, DP3)
Disk	CEDGE_ON_GPFACE(datum3) VERTEX_ONGEDGE(<u>shaft axis</u>)
Gear hole	VERTEX_ON_GPFACE(disk) SEGE_ON_GSEGE(<u>shaft axis</u>)
Base	PFACE_ON_GPFACE(datum1) VERTEX_GPFACE_MIRROR_VERTEX×4
Left wall	VERTEX_ON_GVERTEX×2 PFACE_PARALLEL_GPFACE(datum3)
Right wall	VERTEX_ON_GVERTEX×2 PFACE_PARALLEL_GPFACE(datum3)
Shaft hole 1	VERTEX_ON_GPFACE(left wall) SEGE_ON_GSEGE(<u>shaft axis</u>)
Shaft hole 2	VERTEX_ON_GPFACE(right wall) SEGE_ON_GSEGE(<u>shaft axis</u>)

Fig. 8 Geometric constraint for each feature

Fig. 8은 각 특징형상의 위치관계를 정의하기 위해 사용자로부터 입력된 형상구속조건들을 나타낸다. 예를 들어 Fig. 7의 (e)의 모양처럼 gear hole이 위치되기 위해서 사용자로부터 2개의 형상구속조건이 입력되었는데 이들은 VERTEX_ON_GPFACE(disk)와 SEDGE_ON_GSEEDGE(shaft axis)이다. 첫번째 것은 VERTEX is ON Given Planar FACE의 의미이며 gear hole 특징형상의 중간점 vertex가 먼저 모델링되어 주어진 disk 평면 위에 놓여야 한다는 것을 뜻하고 두번째 것은 Straight EDGE is ON Given Straight EDGE의 의미이며 gear hole 특징형상이 이루는 직선이 먼저 모델링되어 주어진 shaft axis 직선 위에 겹쳐져 놓여야 함을 뜻한다. 다른 특징형상에 부여된 형상구속조건들도 이와 유사한 규칙으로 표시되어 있다.

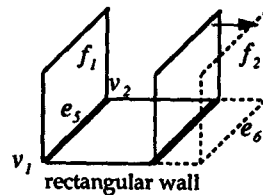
4.2 형상구속조건 및 특징형상의 위치계산

앞서 설명한 바와 같이 본 시스템의 특징형상의 위치 및 크기에 관한 설계의도는 형상구속조건을 통해 표현되고 저장된다. 특징형상에 관한 기존의 연구자들^(13~16)이 지적한 특징형상 기반시스템의 기본요구 기능 중 특징형상의 위치결정은 적절한 사용환경으로서 원활한 모델링작업을 위하여 매우 유용하고 중요한 기능으로 이의 성공적인 해결이 사용자환경의 개선에 관건이라는 지적⁽¹⁶⁾이 있으며, 크게 전체 좌표계에 대한 절대위치 입력방식과 다른 특징형상들에 대한 상대위치 입력방식으로 구별된다.⁽¹³⁾ 이중 상대위치 입력방식이 보다 우월한 것으로 평가되는데 그 이유는 우선 상대위치가 결정되는 구속조건들을 요약, 관리함으로써 특징형상의 위치결정에 대한 설계자의 의도를 수용할 수 있고 따라서 모델내에 특징형상이 수정되었을 때 그와 관련되는 다른 특징형상들에 그 변화를 자동으로 전파시킴으로써 설계의도를 계속 유지하도록 할 수 있기 때문이다. 사용자로부터 형상구속조건이 입력되면 시스템은 이를 풀어 특징형상의 위치를 결정해야 하는데 Fig. 9는 그 예를 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 사각평판이 인스턴스된 임의의 위치로부터 (c)의 형상구속조건을 만족하도록 초기배치되는 경우이고 (b)는 이미 위치되었다가 주위의 특징형상의 변화로 인해 재배치되는 경우이다. 그런데 이때 (a)의 경우 크기가 딱 들어맞으면 단순히 강체변환이동(rigid body transformation)으로 충



rectangular wall

(a) Initial-positioning



rectangular wall

(b) Re-positioning

e_1 is on	e_5
e_2 is on	e_6
e_3 passes through	v_1
e_3 passes through	v_3
e_4 passes through	v_2
e_4 passes through	v_4

(c) Geometric constraint on rectangle wall

Fig. 9 Positioning of rectangular wall

분하지만 크기가 맞지 않거나 (b)와 같은 경우는 현재의 크기를 변화시켜가며 만족되는 크기와 위치를 함께 구해주어야 항상 세 평면이 맞닿아 연결되기를 원하는 설계자의 의도를 충족시켜 줄 수 있다. 이와 같은 요구조건은 조립체모델링에서 부품의 위치를 구하는 기존의 연구^(12,17~20)나 Kramer^(21~23)가 제안한 GCSP(geometric constraint satisfaction problem)의 기호적(symbolic) 접근방법과는 강체가동만이 아니라는 점에서 구별되며, 변이형상(variation geometry)기법^(24~26)과는 대변이를 일으킨다는 점에서 차이가 있다.

이와 같이 특징형상의 크기와 위치를 동시에 결정하기 위해 본 연구에서는 구해야 할 변수를 특성

점(characteristic point)^(24,25)으로 하고 이들 특성점의 함수식으로 형상구속조건을 정의한다. 특성점이란 어떤 물체의 형상을 대표할 수 있는 점들로 그 위치가 모두 정해지면 해당 물체의 형상은 완전히 정의된다. 따라서 형상구속조건을 만족시키는 특성점들의 위치로부터 특정형상의 크기와 위치가 결정될 수 있다. 따라서 형상구속조건들은 특성점에 대한 함수식으로 표현되어야 한다. 그런데 형상구속조건은 설계자가 그것들을 통하여 위치 결정에 관한 설계의도를 표현할 수도 있어야 하므로 양면적 요구조건을 갖게 된다. 즉, Fig. 9의 형상구속조건중 “ e_1 is on e_5 ”라는 조건은 설계의도를 표현하는 형상구속조건인데 시스템에게 특성점에 대한 구속조건식을 제공하기 위해서는 “ v_5 is on e_5 ”와 “ v_6 is on e_5 ”의 형태로 전환되어야 한다. 따라서 형상구속조건은 상위구속조건(high-level constraint)과 하위구속조건(low-level constraint)으로 나뉘어지며 사용자가 입력하는 상위구속조건들은 시스템이 풀수 있는 하위구속조건들의 조합으로 표현된다. 따라서 시스템은 상위구속조건이 어떤 하위구속조건으로 변환되어야 하는지를 알고 있으며 하위구속조건을 풀기위한 풀이기구(solver)를 가지고 있다. 본 연구에서 구현된 상위구속조건들의 수는 약 30여개로 이들은 약 25개 가량 준비된 하위구속조건들 중에서 적당한 것의 조합으로 변환되어 시스템이 풀방정식을 만들어내게 된다.

형상구속조건에 의한 비선형 방정식들이 모두 얻어지면 시스템은 이를 Newton-Raphson 반복법⁽²⁷⁾을 사용하여 수치적으로 풀게 된다. 그러나 이 방법은 주어진 식의 개수가 구할 변수의 개수와 일치하면서 잉여식이나 충돌식이 없는 완전한 조건일 때만 사용될 수 있다. 그런데 여기서 만들어지는 식들은 그런 완전한 조건을 갖추지 못한다. 우선 대화식 시스템의 특성상 사용자가 형상을 충분히 구속시키기 위해 중복되는 형상구속조건을 입력할 수 있다. 또 특정형상이 임의의 위치에 인스턴스될 때 주어진 초기치수 조건은 경우에 따라 사용되어야 할 때도 있고 무시되어야 할 때도 있다. 즉 특정형상의 초기치수가 그대로 사용되기를 원하는 경우 사용자는 치수를 제한하는 형상구속조건을 따로 부여하지 않을 것이며 이때 초기치수조건은 사용되어야 한다. 반면 Fig. 9의 (b)의 경우에는 가로길이의 초기치수 조건이 형상구속조건과 충돌을 일으키므로 반드시 버려져야만 하며 또 Fig. 9

의 (a)에서 크기가 딱 맞는 경우는 초기치수조건은 충돌되지 않고 단지 잉여식이 될 뿐이다.

이와 같이 방정식들은 일반적으로 변수보다 훨씬 많이 얻어지게 되고 이중에는 해를 구하기 위해 필요한 식과 무시되어야 하는 잉여식, 그리고 반드시 버려져야 하는 충돌식들이 섞여 있는데 각각의 식이 어디에 해당하는지는 부여된 형상구속조건에 형태뿐만 아니라 형상구속조건에서 참조된 다른 형상의 위치에 따라 매번 달라지게 된다. 따라서 풀이기구(solver)는 이를 자동적으로 감지하여 해를 구해낼 수 있어야 한다. 이를 위하여 본 연구에서는 선택적 풀이방법(selective solving method)을 고안하였다. 이 방법의 기본개념은 구속조건식에 우선순위를 부여하여 어떤 구속조건식이 자기보다 높은 우선순위의 구속조건식에 대해 잉여식 또는 충돌식여부가 판단되면 이를 버림으로써 풀이에 사용할 식을 선택적으로 고를 수 있게 하는 것이다. 이 방법을 사용하려면 우선 구속조건식들의 우선순위를 정해야 하는데, 우선순위는 그 식이 어떤 구속조건에 의해 생겨난 것인지에 따라 결정된다. 본 연구에서 분류한 구속조건식의 종류와 순위는 다음과 같다.

- 내재구속조건
- 사용자정의 구속조건
- 초기치수 구속조건
- 회전금지 구속조건

내재구속조건(implicit constraint)은 특정형상이 만족해야 할 본연의 성질이다. 예를 들어 Fig. 9의 사각평판은 항상 네 꼭지점이 한 평면상에 놓여야 하고 마주보는 변끼리는 길이가 같아야 하며 네각은 직각이 되어야 한다. 이런 성질은 어떤 경우에도 위배되어서는 안되므로 가장 높은 우선순위를 갖는다. 초기치수 구속조건(default dimension constraint)은 사용자정의 구속조건만으로는 크기가 정해지지 않으면 사용되어야 하며 사용자정의 구속조건(user-defined constraint)이 크기까지 지정하게 되면 무시되어야 하므로 사용자정의 구속조건보다 낮은 우선순위가 된다. 한편 회전금지 구속조건(fix free rotation constraint)은 중심 축에 대해 회전대칭인 특정형상의 경우 사용되는 것이다. 회전대칭인 물체는 회전축에 대해 어떤 각도로 위치되어도 같은 형상이 되므로, 사용자는 회전방향의 자유도는 제한시키지 않으면서 시스템이 임의의 각도로 위치시켜 주기를 기대하게 된다. 따라서 사용

자의 입력에 의해서는 회전자유도를 구속시키는 구속조건식이 입력되지 않으므로 이것만 가지고는 해를 구할 수 없게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 회전대칭인 특징형상은 회전운동을 임의의 각도로 고정시키는 조건식을 동반하며 낮은 우선순위를 가진다.

방정식의 우선순위가 정해지면 선택적 풀이방법은 다음과 같이 수행된다.

(1) 조건식을 우선순위에 따라 배열한 후 변수의 개수만큼 높은 우선순위의 식을 취한다.

(2) 풀이를 시도하여 해가 구해지면 종료하고 잉여식이 검출된 경우에는 그 중 임의의 식을, 충돌식이 검출된 경우에는 가장 낮은 우선순위의 식을 버린다.

(3) 다음 우선순위의 식을 하나 취하고 (2)로 돌아간다. 만일 더 이상 취할 식이 남아있지 않으면 사용자가 형상구속조건을 불충분하게 입력한 것이

므로 이를 출력하고 종료한다.

위의 과정중 잉여식, 충돌식의 검출은 Newton-Raphson방법으로 계산도중 반복과정에서 선형 연립방정식을 풀 때 자코비안(Jacobian)이 특이행렬(singular matrix)이 되는지를 봄으로써 이루어진다. 즉 선형 연립방정식을 풀기 위해 가우스소거법⁽²⁷⁾을 사용할 때 하나의 열(row)이 모두 0이 되면 그때의 레지듀얼(residual) 벡터 항이 0이냐 아니냐에 따라 각각 잉여식, 충돌식의 여부가 밝혀지게 된다. 한편 잉여 또는 충돌은 서로 상대적인 것인데, 열이 모두 0이 된 식이 생기면 그때까지 피벗(pivot)된 식들이 서로 잉여 또는 충돌임을 알 수 있다.

5. 개념모델의 상세화

개념모델이 작성되면 이를 바탕으로 상세모델을

detailing design parameter :
radius (r)

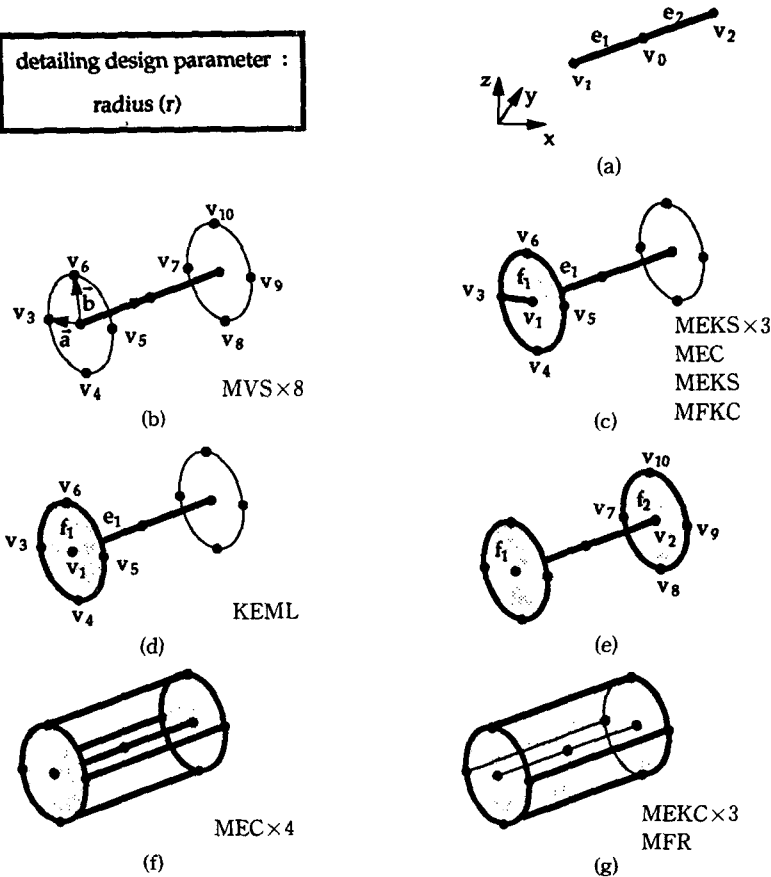


Fig. 10 Detailing of shaft feature

작성하게 된다. 상세모델 작성의 기본순서는 축약 모델상태로 존재하는 각각의 특징형상에 살을 붙여 부피를 가지는 입체로 만드는 과정과 상세화된 특징형상들 간의 불리안조작을 통한 부품 형상모델의 생성과정이다. 개별 특징형상의 상세화는 특징형상 내에 저장되어 있는 상세화 방법을 이용하여 이루어지는데 이것은 비다양체모델링 기능을 호출하는 오일러조작⁽²⁸⁾으로 기술되어 있다. 한편 상세화 작업이 이루어지기 위해서는 상세화를 위한 매개변수의 값이 먼저 사용자에게 의해 입력되어야 하는데 각 특징형상의 상세화를 위한 매개변수는 Fig. 5에 표시되어 있다. 이중에 사각평판, 원판 및 원기둥판은 두께를 부여할 때 방향성이 있는데 본 시스템에서는 원하는 한쪽의 방향만 혹은 양쪽방향에 서로 다른 두께를 줄 수 있다. 그리고 축과 축구멍의 경우, 그 두개가 서로 축결합의 관계를 가지고 있을 때는 한쪽이 정해지면 다른 한쪽이 이를 상속^(13,14) 받아 자동적으로 정해지기도 한다. 이러한 상속관계는 모델의 수정시 한쪽 설계변수의 값이 변화되면 이를 다른 쪽으로 전파시키는 데에도 사용된다. Fig. 10은 축을 상세화하기 위해 시스템이 적용하

는 오일러조작들을 보여주고 있다. 한편 위와 같은 과정중에 만들어지는 모든 영역, 면, 모서리 및 꼭지점은 모두 상세모델의 표현을 위한 것이므로 속성(attribute)으로 상세층이라는 정보를 기록한다. 따라서 최종형상은 Fig. 10의 (g)와 같이 축약층 모델과 상세층 모델의 모든 요소들을 하나의 형상 모델에 모아놓은 형태가 되고, 필요에 따라 원하는 층의 모델을 추출할 수 있다.

한편 상세화과정에서는 특징형상 단위의 상세화 이외에도 추가 특징형상의 모델링이 필요해지기도 한다. 예를 들면 Fig. 2의 물체에서 기어축을 원통형태로 상세화하면 축과 브래킷사이에 회전운동뿐 아니라 병진운동도 가능하게 되어 사용자가 입력한 회전조인트가 구현되지 않는다. 이는 본 시스템에 포함된 운동해석⁽²⁹⁾모듈에 의해 검사되어 사용자에게 통지된다. 사용자는 이 문제를 형상변화를 통해 해결해야 하는데 여기서는 축에 원통형 특징형상을 추가시켜 단차를 주어 원하는 상대운동을 구현하였다.

위와 같이 특징형상의 상세화가 모두 끝나면 부품모델을 얻기 위해 불리안 조작을 행하게 되는데

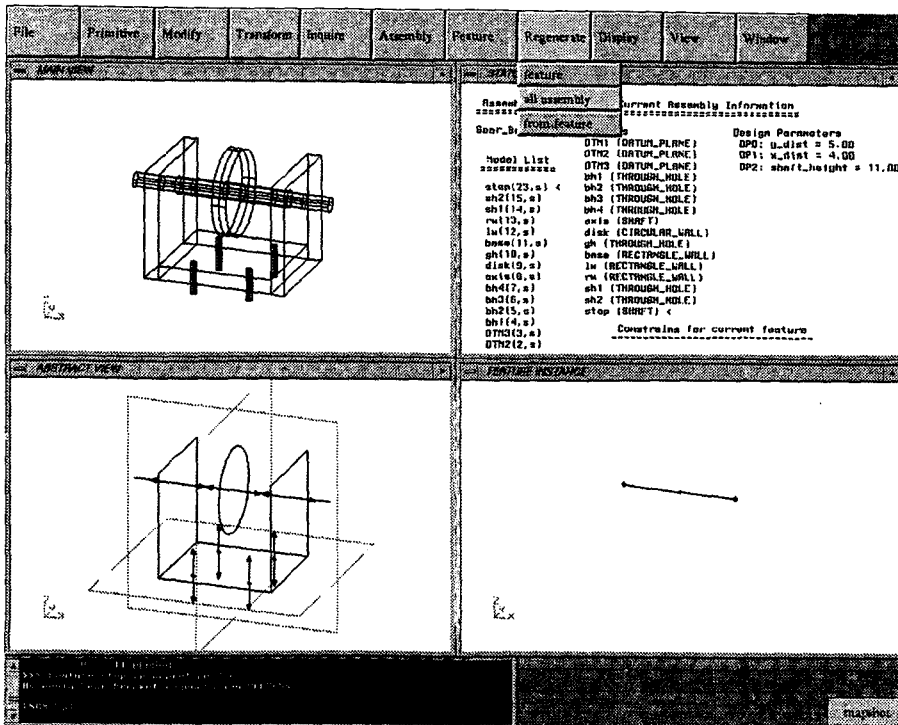


Fig. 11 Abstract and detail model of case study

이때 각 특징형상이 더해져야 하는지, 혹은 빼져야 하는지는 특징형상의 정의에 포함되어 있는 형상기여방법(shape contribution method)에 의해 결정된다. 본 연구에서는 이러한 작업을 위하여 비다양체의 불리안조작 기능을 개발하였다.⁽³⁰⁾

6. 적용 예

적용 예로는 Fig. 2에 표시된 기어-축 조립체가 모델링 되었다. 개념모델과 상세모델의 생성과정은 앞서 설명된 바와 같다. Fig. 11의 좌측아래 윈도우는 축약모델을 보여주고 있고 좌측위 윈도우는 각 특징형상들이 상세화된 모습을 보여주고 있다. 이때 이 두 가지는 서로 독립된 것이 아니라 하나의 비다양체 모델을 화면표시만 다르게 한 것이다. 즉 위의 것은 축약층과 상세층의 요소들을 모두 그린 것이고 아래는 축약층의 요소만 그려 보인 것이다. 이렇게 관점에 따라 다르게 표현되는 두 가지의 모델이 하나의 비다양체 모델에 통합됨으로써 서로간의 일관성을 유지할 수 있다. Fig. 12는 불리안조작을 통해 얻어진 부품의 형상모델들로 이루어진

최종 조립체모델을 보여주고 있다. 한편 본 연구에서 사용된 비다양체모델링 시스템은 이상현⁽²⁸⁾의 간결한 자료구조를 사용하여 서울대학교 CAD 연구실에서 개발된 것이다.

7. 결 론

본 연구에서는 하향 설계방식의 모델링과정이 요구하는 특성들을 논의하고 그에 따른 시스템의 형태를 결정하였다. 본 연구의 시스템이 가지는 형태적 특징은 비다양체모델링 시스템을 기반으로 한다는 것, 특징형상을 이용한 모델링 기능을 제공한다는 것, 그리고 형상구속조건을 통해 설계의도를 표현하고 관리한다는 것으로 요약될 수 있다. 이러한 특성은 하향 설계과정에서 필요로 하는 기능들, 즉 개념설계 모델링의 지원과 이를 바탕으로 한 개념모델의 상세화, 상세화 진행시 설계의도의 효율적인 반영, 그리고 조립체 설계를 통한 부품의 설계등을 만족시켜줄을 보였다. 본 연구에서 제시한 개념의 조립체 모델링 시스템의 사용은 설계의 큰 비중을 차지하는 개념설계 단계부터 컴퓨터의 지원을

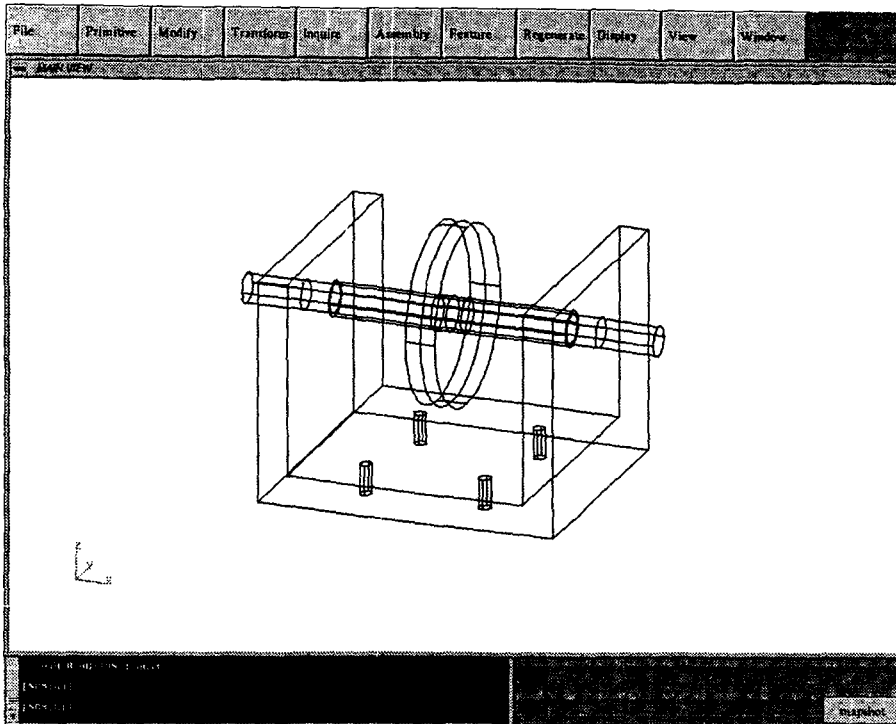


Fig. 12 Final assembly of case study

가능하게 함으로써 설계자는 자신의 설계의도를 손쉽게 표현하고 구현할 수 있고 따라서 보다 창조적인 설계의사 결정작업에 몰두할 수 있다. 이는 단 시간에 많은 설계 대안들을 만들어 볼 수 있으므로 해서 향상된 설계결과를 얻는데 기여할 수 있을 것이라 기대된다.

후 기

본 연구는 한국학술진흥재단의 국제공동연구 지원에 의해 마무리되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- (1) Arai, E. and Iwata, K., 1992, "Product Modeling System in Conceptual Design of Mechanical Products," *Robotics & Computer-Integrated Manufacturing*, Vol. 9, No. 4/5.
- (2) Dixon, J. R., 1988, "Unresolved Research Issues in Development of Design-with-Features Systems," *IFIP WG 5.2/NSF Working Conference on Geometric Modeling*, Rensselaerville, U. S. A.
- (3) Libardi, E. C. and Dixon, J. R., 1988, "Computer Environments for the Design of Mechanical Assemblies: A Research Review," *Engineering with Computers*, pp. 121~136.
- (4) *ADAMS Reference Manual Version 6.0*, 1991, Mechanical Dynamics.
- (5) *DADS-3D Users Manual*.
- (6) Weiler, K. J., 1986, "Topological Structures for Geometric Modeling," PhD Thesis, RPI.
- (7) Choi, Y., 1989, "Vertex-Based Boundary Representation of Non-Manifold Geometric Models," Ph. D Thesis, Carnegie Mellon University.
- (8) Masuda, H., Shimada, K., Numao, M. and Kawabe, S., 1990, "A Mathematical Theory and Applications of Non-Manifold Geometric Modeling," *Geometric Modeling for Engineering Applications*, Krause, F. L. and Jansen, H. (Editors), North-Holland.
- (9) Lieberman, L. I. and Wesley, M. A., 1977, "Autopass: An Automatic Programming System for Computer Controlled Mechanical Assembly," *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 21, pp. 321~333.
- (10) Eastman, C. M., 1981, *The Design of Assemblies*, in SAE Technical Paper Series, Society of Automotive Engineers, Inc.
- (11) Tilove, R. B., 1983, "Extending Solid Modeling Systems for Mechanism Design and Kinematic Simulation," *IEEE Computer Graphics & Applications*, Vol. 3, No. 3, pp. 9~19.
- (12) Lee, K. and Gossard, D. C., 1985, "A Hierarchical Data Structure for Representing Assemblies: Part 1," *Computer Aided Design*, Vol 17, No 1.
- (13) Shah, J. J., 1991, "Conceptual Development of Form Features and Feature Modelers," *Research in Engineering Design*, pp. 93~108.
- (14) Shah, J. J. and Rogers, M. T., 1988, "Expert Form Feature Modelling Shell," *Computer Aided Design*, Vol. 20, No. 9.
- (15) Shah, J. J., 1991, "Assessment of Features Technology," *Computer Aided Design*, Vol. 23, No. 5.
- (16) Pratt, M. J., 1988, "Synthesis of An Optimal Approach to Form Feature Modelling," *Proceeding of the ASME International Computers in Engineering Conference*, pp. 263~274.
- (17) Lee, K. and Andrews, G., 1985, "Inference of the Positions of Components in an Assembly: Part 2," *Computer Aided Design*, Vol 17, No 1.
- (18) Rocheleau, D. N. and Lee, K., 1987, "System for Interactive Assembly Modelling," *Computer Aided Design*, Vol 19, No 2.
- (19) Kim, S. H. and Lee, K., 1989, "An Assembly Modelling System for Dynamic and Kinematic Analysis," *Computer Aided Design*, Vol 21, No 1.
- (20) Srikanth, S. and Turner, J. U., 1990, "Toward a Unified Representation of Mechanical Assemblies," *Engineering with Computers*, Vol. 6, pp. 103~112.
- (21) Kramer, G. A., 1991, "Using Degrees of Freedom Analysis To Solve Geometric Constraint Systems," *Proc. Symposium on Solid*

- Modeling Foundations and CAD/CAM Applications*, Austin, Texas.
- (22) Anantha, R., Kramer, G. A. and Crawford, R. H., 1992, "An Architecture to Represent Over-, Under- and Fully Constrained Assemblies," *Proc. of ASME Conference*, pp. 233~244.
- (23) Kramer, G. A., 1992, "A Geometric Constraint Engine," *Artificial Intelligence*, pp. 327~360.
- (24) Light, R. and Gossard, D., 1982, "Modification of Geometric Models Through Variational Geometry," *Computer Aided Design*, Vol. 14, No. 4.
- (25) Lin, V. C., 1981, "Three-Dimensional Variational Geometry in Computer-Aided Design," Master Thesis, MIT.
- (26) Lin, V. C., Gossard, D. C. and Light, R. A., 1981, "Variational Geometry in Computer-Aided Design," *ACM Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3.
- (27) Burden, R. L., Faires, J. D. and Reynolds, A. C., 1981, *Numerical Analysis*, Prindle, Weber & Schmidt.
- (28) 이상현, 1993, "사출성형 제품의 설계 및 해석의 통합환경을 제공하기 위한 비다양체 모델링 시스템의 개발," 서울대학교, 박사학위논문.
- (29) 김성환, 1988, "동역학 및 기구학적 해석을 위한 조립체 모델링 시스템," 서울대학교, 석사학위논문.
- (30) 김성환, 이진우, 1992, "비다양체 모델의 볼리안 기능의 개발," 대한기계학회 '92년도 추계 학술대회 논문집(1), pp. 429~432.