

기계 제품의 개념 설계를 위한 하향 설계 지원 CAD 시스템의 개발

홍진웅*, 이건우**

Framework of a CAD System to Support Design Process Modeling of Mechanical Products

Hong, J. W.* and Lee, K. W.**

ABSTRACT

Current CAD systems are good enough to be used as a tool to manipulate three-dimensional shapes. This is a very important capability to be owned by a design tool because a major portion of designers' activities is spent on the shape manipulation in the design detailing process. However, the whole design process involves a lot more than the shape manipulation. Currently, these remaining tasks, mostly logical reasoning process for the function realization together with structure decomposition in the top-down manner, are processed in the designer's brain. To support the top-down functional design process of a mechanical product, a system integrating the functional, structural and geometrical aspects of a product design in a unified environment is presented. Using this system, a designer can perform function decomposition, structure decomposition, and geometry detailing, and function verification activities in parallel and the whole design process is modeled resultantly. Once the whole design process is modeled, any redesign task can be automatically performed with the verification of the desired functions.

Key words : Top-down design, Functional design, Design process modeling, Dimensioning strategy

1. 서 론

전통적인 기계 설계용 CAD 시스템은 주로 강력한 형상 처리 기능으로 인하여 설계 도구로서 사용된다. 설계자의 설계 행위의 상당 부분이 설계 상세화 과정상의 형상 처리에 소모되기 때문에 이것은 설계 도구가 갖추어야 할 중요한 기능이 되고 있다. 그러나 전체 설계 과정은 형상 처리 이상의 것을 요구한다. 즉 형상 처리는 설계 과정의 단지 절반 정도에 불과하다는 것이다. 나머지 절반은 기능 분화 과정이다. 설계자에게 설계 업무가 주어졌을 때, 보통 최종 설계물의 요구 기능 형태로 주어진다. 이때 설계자의 역할은 최종 조립된 제품이 요구 기능을 수행하도록, 필요한 형상을 가진 부품들의 조합으로 된 제

품을 정의하는 것이다. 설계자는 보통 매우 유사한 기능을 가진 제품이 이미 존재하지 않는 한 요구 기능으로부터 바로 부품의 상세 형상이나 부품간 연결 관계를 도출해 내기 힘들다. 대신에 각각의 요구 기능을 적절한 부품들의 형상이나 그들 간의 연결 관계에 대응시킬 수 있을 때까지 더 작은 하위 기능들의 조합으로 분화하게 된다. 요구 기능에 대한 형상의 적합성은 설계자가 사용 가능한 기능 검증 도구에 의해 검증된다. CAE 소프트웨어는 가장 일반화된 검증 도구 중 하나이다. 필요한 형상이나 부품간 연결관계가 결정되었을 때만 설계자는 현재의 CAD 시스템의 형상 처리 기능을 이용하여 설계를 상세화시켜 나갈 수 있다. 기능 분화 과정, 그리고 형상 상세화 과정과 동시에 일어나는 구조 분화 과정은 전적으로 설계자의 머리 속에서 다루어진다. 따라서 전체 설계 과정이나 설계 이력은 저장되지 않고 재설계 과정에서 다시 사용되지도 못한다. 단지 그 일부만 기술 보고서 형태로 보존된다. 이상적인 설계 과

*정회원, 삼성SDS CAD사업팀
**중신회원, 서울대학교 기계항공공학부
- 논문투고일: 2000. 6. 12
- 심사완료일: 2000. 9. 22

정 모델러는 하향(top-down) 방식의 기능 분화와 구조 분화를 지원할 수 있어야 한다. 그리고 설계자가 설계를 진행함에 따라 설계자에 의해 수행된 설계 검증 행위의 기록을 저장하고 있어야 한다. 이 기능에 의해 효과적인 재설계가 자동적으로 이루어질 수 있게 된다.

Libardi, Dixon, Simmons¹¹는 전기 제품 혹은 전자 제품의 개념 설계 및 하향 설계에 사용되던 개념들을 적용함으로써 기계 제품의 설계를 위한 컴퓨터 환경을 제안하였다. 그들은 하향 설계 지원, 개념 형상 처리, 기능의 표현 그리고 다양한 기능상의 관점 등을 주요 요구 사항으로 정의하였다. Sodhi, Tumer¹²는 기계 제품의 상향(bottom-up) 조립체 모델링에 대한 기존의 연구를 정리하고 조립체 모델링을 하향 방식의 기계 제품 설계에 적용하기 위한 시스템 요구사항을 제시하였다.

Mantyla¹³는 여러 층에서 생성된 제품 정보와 하향 설계 과정이 진행됨에 따라 여러 층에서 상세화된 형상 정보를 다중 트리 자료구조를 이용하여 표현하는 조립체 중심의 하향 설계 지원 시스템을 제안하였다. 형상 정보는 형상 구속조건 네트워크를 처리함으로써 적절하게 관리된다. Mantyla는 제품의 기능적인 관계와 구조적인 관계를 설계 과정 중에 동시에 모델링 하는 방법을 택하였으나 기능을 표현하고 검증하는 방법에 대해서는 고려하지 않았다.

Gui¹⁴는 Mantyla의 연구를 확장했는데, Mantyla의 접근 방법과는 다르게 제품의 기능적인 관계를 다중 그래프 자료구조에 의해 중점적으로 표현하는 시스템을 제안하였다. 이 시스템에서는 제품의 구조적인 관계는 다중 그래프 자료구조로부터 몇 가지 추론 규칙에 의해 도출된다. Mantyla의 연구에서는 고려되지 않았던 기능 검증 도구는 본드 그래프로 구현하였다.

Horvath¹⁵는 구조적으로 개념적인 형상을 정의하는 파라미터와 그 형상의 가능한 동작을 규정하는 파라미터를 포함하는 개념 특정형상 라이브러리를 구성하였다. 개념 설계 단계에서 설계자는 개념 특정형상을 연결하여 구조물을 구성하고 그 구조물의 정적인 혹은 동적인 해석을 수행할 수 있다. 이 시스템은 구조적인 모델로부터 제품의 기능적인 관계를 도출한다. 그러나 하향 설계 과정에서 제품의 기능과 구조의 점차적인 분화에 대한 고려는 하지 않고 있다.

Deng, Tor, Britton¹⁶은 기계 제품의 개념 설계 단계를 지원하기 위한 기능 모델링 설계 환경을 제안하였다. 이 시스템에서 모델링 과정은 초기 기능 분화와 요구 기능을 관련 기능으로 변환하는 작업부터

시작한다. 이 정보는 하위 행위의 네트워크로 구성된 인과 행위 과정(causal behavioral process)을 구성하는 데 사용된다. 그리고 나서 초기 기능 설계 모델을 생성하기 위해 각각의 하위 행위에 대응하는 물리적 요소들이 구성된다. 이 방법은 기능 모델링과 분화에 중점을 두고 있고 구조적 분화는 단지 이미 존재하는 구조 요소에 대응하는 행위를 통해 실현된다. 그래서 설계자와의 상호작용에 의한 구조적 분화와 형상 상세화 역시 중요한 작업이 되는 전체 설계 과정을 완전하게 지원하지는 못한다.

이상의 연구는 제품의 요구 기능을 만족시키기 위해 설계자가 제품의 기능과 구조적 관계를 모델링하고 기능 구현 여부를 검증하는 해석 기반의(analysis-based) 기능 설계 방법에 대한 것이다. 반면에 최근의 몇몇 연구는 설계자가 기능적 관계와 제품에 의해 충족되어야 하는 다양한 구속조건을 지정하고 시스템은 지정된 조건을 만족하는 구조적 관계와 형상을 가지는 설계 대안들을 설계 공간에서 탐색하는 통합 기반의(synthesis-based) 기능 설계 방법을 제시하고 있다. CONGEN¹⁷, CAMF¹⁸, DOME¹⁹은 이 범주에 속하는 시스템들이다. 통합 기반의 방법은 3차원의 상세화된 솔리드 형상이 없이 몇몇 설계 파라미터만이 관계되는 개념 설계 단계에서 유용한 도구가 될 수 있다. 그러나, 기본 설계와 상세 설계 단계에서는 설계 파라미터와 중요 치수가 주체 못할 정도로 급격하게 증가하여 설계 공간이 매우 복잡해지고 기능 검증을 위한 도구도 다양화된다.

이 논문에서 제안하는 시스템은 특정한 해석 기반의 방법이나 통합 기반의 방법을 제시하는 것이 아니라 이 두 가지 방법이 동일한 프레임워크 내에서 수행될 수 있고 특정 설계 영역에 제한 받지 않는 범용 설계 도구를 제공한다. 즉, 기능 분화, 구조 분화, 형상 상세화 그리고 요구 기능에 대한 기능 검증 등의 설계 행위가 지원되는 설계 과정 모델러를 제시한다. 또한 이 시스템에서는 기능, 기능에 부속되는 기능 검증 도구, 분화된 구조, 상세화된 형상, 그리고 치수 기입 전략의 형태로 표현되는 설계 의도를 저장한다. 이에 따라 재설계 과정의 자동화가 가능하고 미리 정의된 설계 의도에 대해 재설계 결과의 적절함을 평가할 수 있게 한다.

2. 시스템 개요와 구조

2.1 설계 과정 모델

설계 과정 모델러의 요구 기능을 파악하기 위해서

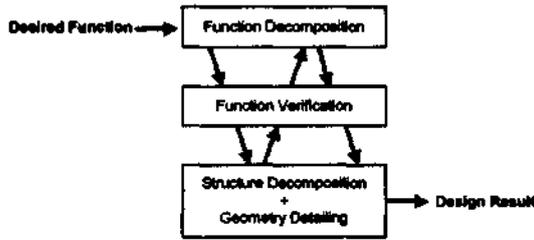


Fig. 1. Activity flow in design process.

는 설계 과정에서의 설계 행위의 흐름을 분석할 필요가 있다. 설계자가 설계를 진행함에 따라 취하는 행위는 Fig. 1과 같이 설명될 수 있다. 설계자에게 설계 업무가 할당될 때 보통 최종 설계 결과물의 요구 기능 형태로 제시된다. 설계자는 매우 유사한 기능을 가진 제품이 이미 존재하지 않는 한 대개의 경우 요구 기능으로부터 바로 부품의 상세 형상이나 부품간 연결 관계를 도출해내기 힘들다. 대신에 각각의 요구 기능을 적절한 부품들의 형상이나 그들간의 연결 관계에 대응시킬 수 있을 때까지 더 작은 하위 기능들의 조합으로 분화하게 된다. 각각의 분화 과정에 대해, 요구 기능에 대한 형상의 적합성은 설계자가 사용 가능한 기능 검증 도구에 의해 검증된다. 필요한 형상이나 부품간 연결관계가 결정되었을 때만 설계자는 현재 CAD 시스템의 형상 처리 기능을 이용하여 설계를 상세화 시켜 나갈 수 있다. 결국 설계 과정 모델러를 구현하기 위한 주요 시스템 기능은 기능 분화 도구(function decomposer), 구조 분화 도구(structure decomposer), 형상 상세화 도구(geometry detailer) 그리고 기능 검증 도구(function verifier)가 된다.

2.2 시스템 모듈

네 개의 주요 시스템 기능을 구현하기 위해서 여기서 제안하는 설계 과정 모델러는 Fig. 2와 같이 구성된다. 제품 구성 생성자(product configuration builder) 모듈은 설계자가 노드와 노드간의 링크를 생성함으로써 기능과 구조의 계층 트리를 형성하도록 도와준다. 이것은 단지 제품의 기능적인 구성과 구조적인 구성의 형태를 생성하도록 할 뿐 형상이나 기능 자체를 지정하도록 하지는 않는다. 실제 의미 있는 제품 구조와 형상은 시스템에 포함된 형상 모델러(geometric modeler)와 치수 구속조건 관리자(dimensional constraint manager)를 통해 지정된다. 마찬가지로 기능은 기능 모델러(function modeler)를 통해 지정된다. 또한 설계자는 기능 모델러를 통해 기능이 지정

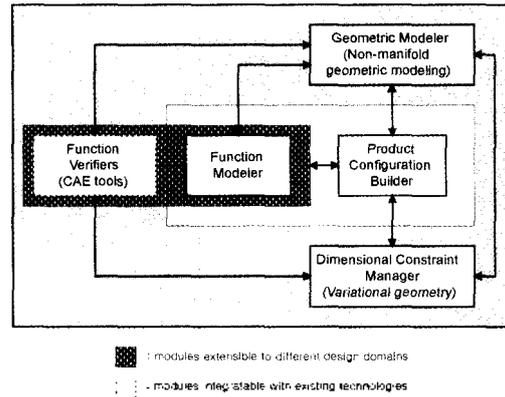


Fig. 2. System structure.

된 노드에 기능 검증 도구(function verifier)를 부착할 수 있다. 만일 설계자가 설계 과정상에서 어떠한 기능의 경우에 대해 설계 결과를 검증하는 것이 일반적 이라면 그 기능에 대해서는 기능 검증 도구를 부착하는 것이 바람직할 것이다. Fig. 2의 형상 모델러 모듈, 치수 구속조건 관리자 그리고 기능 검증 도구는 비다양체 형상 모델링 커널(non-manifold geometric modeling kernel), 변이 형상(variational geometry), 그리고 다양한 CAE 도구와 같은 기존의 기술들을 각각 이용하여 구현된다. 기능 모델러와 기능 검증 도구는 설계 영역에 따라 달라지는 고유한 지식에 의존한다. 따라서 기능과 그에 관련된 기능 검증 도구의 종류를 쉽게 확장할 수 있는 메커니즘이 제공되어야 한다. 다음 장부터 기능 분화 도구, 구조 분화 도구, 형상 상세화 도구 그리고 기능 검증 도구와 같은 주요 시스템 기능에 대해서 자세하게 설명하겠다.

3. 기능 분화 도구와 구조 분화 도구

3.1 기능 분화

Fig. 3은 본 시스템에서 기계 제품의 설계 과정을

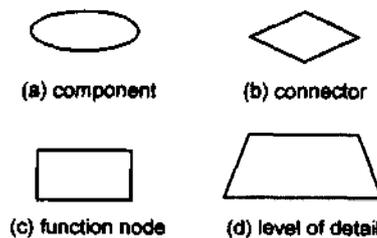


Fig. 3. Design process modeling entities.

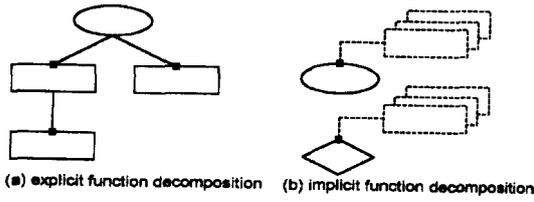


Fig. 4. Function decomposition.

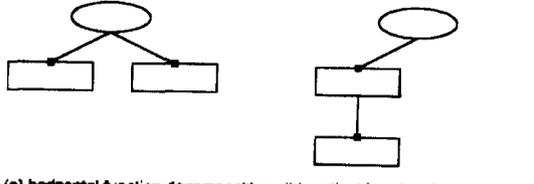


Fig. 5. Function decomposition pattern.

모델링하는 데 사용되는 기본 요소를 보여 준다. 컴포넌트(component)는 제품, 부조립체, 부품과 같은 구조물을 표현한다. 커넥터(connector)는 두 컴포넌트간의 연결관계를 나타내고, 컴포넌트와 커넥터를 모두 구조물 노드라고 한다. 컴포넌트나 커넥터가 실제 의미 있는 설계물이 되기 위해서는 설계자가 기능과 형상을 그 노드에 지정해야 한다.

기능은 Fig. 3(c)의 기능 노드(function node)에 의해 표시된다. 컴포넌트나 커넥터는 명시적으로 분화되거나(Fig. 4(a)) 암시적으로 분화된다(Fig. 4(b)) 다수의 기능을 가질 수 있다. 기능이 명시적으로 분화되는 경우는 분화된 기능간의 검증 우선 순위가 중요해서 설계자가 이를 지정할 때이다. 암시적으로 분화된 기능은 보다 상위의 기능을 만족시키기 위한 하위 기능의 역할을 한다.

Fig. 5는 Fig. 4(a)의 명시적 기능 분화에서 나타나는 기능 분화 패턴을 나타낸 것이다. 수평 기능 분화된 두 기능간에는 종속 관계 없이 어느 것이 먼저 기능 구현이 되어도 상관 없다. 그러나 수직 기능 분화된 두 기능간에는 종속성이 존재해서 반드시 상위 기능이 구현된 후 하위 기능이 구현되어야 한다. 그래서 기능 검증 시에도 상위 기능이 먼저 검증되고 나서 하위 기능이 검증된다.

3.2 기능의 표현

설계자가 앞서 설명한 기능 분화 패턴에 따라 구조물 노드의 기능 분화를 지정하고 나면 분화된 각 기능 노드가 실제 의미 있는 기능을 표현할 수 있도록 기능을 지정해야 한다.

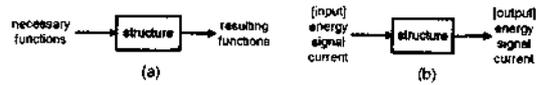


Fig. 6. Representation of a structure's function.

기능 설계 시스템을 구현하기 위해서는, 기능 표현, 기능 구현 그리고 기능 검증의 문제가 해결되어야만 한다. 기존의 연구에서는, Fig. 6(a)와 같이 구조물의 기능을 구조물에 의해 행해지는 결과 기능과 이를 위해 구조물에 제공되어야 할 필요 기능으로 나타내거나^[10-12], Fig. 6(b)와 같이 구조물을 통해 흐르는 에너지, 신호 혹은 전류의 입력-출력 관계로 나타내었다^[13]. Kirschman^[14]은 기능을 표현하고 기능을 분화하기 위해 기존의 연구들이 제시한 방법을 정리하였다.

실제 기계 설계 영역에서는 기계적인 기능들이 너무도 다양하게 확장되어서 단순한 입력-출력 관계만으로는 그러한 기능들을 모두 표현할 수가 없다. Fig. 7은 몇 가지 예를 보여준다. Fig. 7에 설명된 기능들은 입력-출력 관계로 표현될 수도 있다. 그러나 다른 형태의 입력/출력 정보 표현법에 의해서이다. Fig. 7(c)는 컴포넌트의 간섭 없는 조립성 기능을 보여준다. 이 기능은 익숙하지 않게 보일 지도 모르겠으나 실제 설계 과정에서는 매우 자주 검증 되는 기능이다. 설계자가 주어진 기능을 위해 구조물을 분화할 때, 요구 기능의 구현 여부 뿐만 아니라 분화된 구조물간의 간섭 가능성도 항상 확인하게 된다. 이 조립성 기능은 Fig. 6에 있는 어느 방법에 의해서도 표현될 수가 없다. 결론적으로 기계적인 기능들은 단 하나의 표현법에 의해 표현될 수가 없고 더욱이 그들

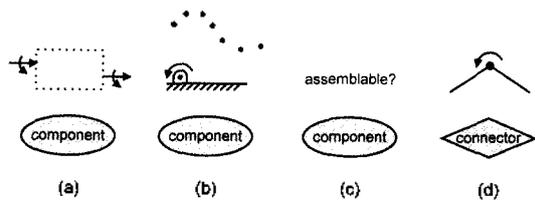


Fig. 7. Examples of the mechanical function.

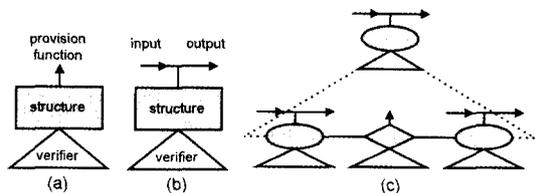


Fig. 8. Representation of a structure's function.

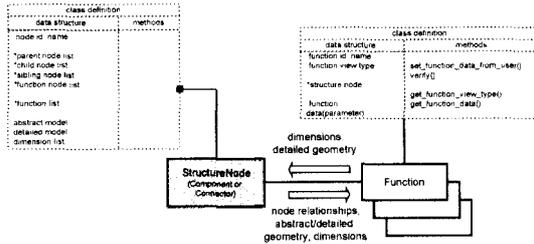


Fig. 9. Separation between a structure node and its functions.

의 검증 도구는 각 기능마다 다르다. 그래서 본 연구에서는 Fig. 8(a)와 (b)에서처럼 구조물의 기능 데이터와 그 검증 도구를 하나의 클래스 객체로 캡슐화시킨다. Fig. 8(c)는 어떤 기능이 같은 기능 데이터를 공유하는 다른 하위 기능들의 조합으로 구현되는 것을 설명한다. 이 경우 상위 기능의 기능 검증 도구는 기능 구현 여부를 검증하기 위해서 각 하위 기능의 기능 데이터를 참조해야 한다.

Fig. 9는 설계 과정 모델의 기본 요소를 구현하는 자료 구조로서 클래스 StructureNode 타입의 구조물 노드와 거기에 지정된 클래스 Function 타입의 기능들간의 관계를 보여준다. 클래스 Function은 객체 지향 설계^[15] 용어로 베이스 클래스에 해당된다. 이 클래스의 'set_function_data_from_user()', 'verify()'와 같은 메소드 함수는 클래스 Function으로부터 상속된 실제 기능 클래스에서 구현되어야 한다. 'set_function_data_from_user()' 메소드 함수는 기능 객체가 생성되고 기능 노드나 구조물 노드에 지정될 때 설계자로부터 기능을 표현하는 설계 파라미터 같은 기능 데이터를 얻기 위해 호출된다. 'verify()' 메소드 함수는 그 기능에 고유한 기능 검증 도구를 구현한다.

3.3 구조 분화

기능 노드는 기능 구현을 위해서 컴포넌트, 커넥터의 조합으로 구조 분화될 수 있는데, Fig. 10은 기능 분화 과정과 구조 분화 과정을 혼합하여 구현한 설계 과정 모델의 예이다. (a)와 같이 수평 기능 분화된 두 기능 노드가 구조 분화된 하위 구조물의 일부 혹은 전부를 공유할 수도 있고, (b)처럼 수직 기능 분화된 두 기능 노드가 분화된 하위 구조물의 일부 혹은 전부를 공유할 수도 있다. 혹은 (c)처럼 수직 기능 분화된 두 기능 노드 중 상위 기능 노드에서 분화된 구조물로부터 재차 분화된 구조물이 하위 기능 노드의 분화된 구조물로 사용될 수도 있다.

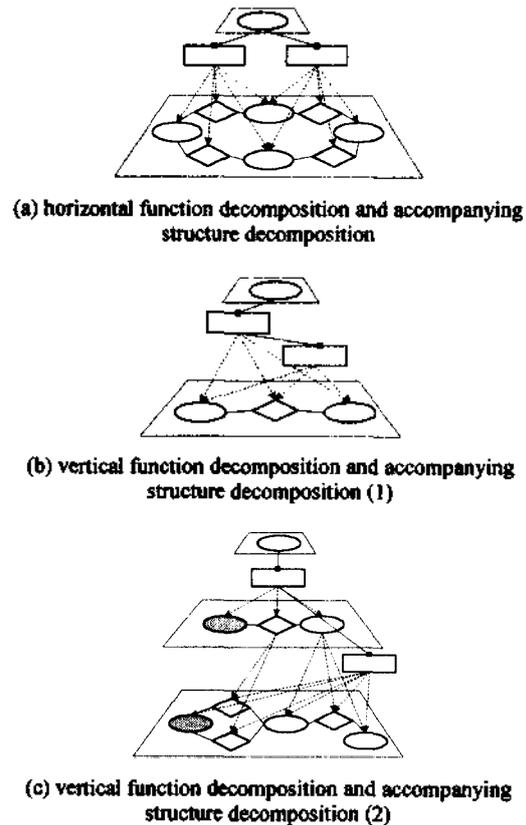


Fig. 10. Design process model with function and structure decomposition (continued).

수직적으로 분화된 두 기능 노드는 설계 순서상 상위가 하위보다 먼저 만족되어야 한다는 제약 조건이 있기 때문에 하위의 기능 노드는 상위의 기능 노드와 같은 구조물을 가리키거나 최소한 한 단계 더 분화된 구조물을 가리켜야 한다.

설계자가 기능 노드에 대해 구조 분화를 지정하고 나면 분화된 각 구조물 노드가 실제 의미 있는 설계물이 될 수 있도록 형상과 하위 기능을 지정해야 한다. 형상을 지정하고 상세화 시키는 과정은 4장에서, 하위 기능을 지정하고 기능을 검증하는 과정은 5장에서 설명하고자 한다.

3.4 상세화 레벨

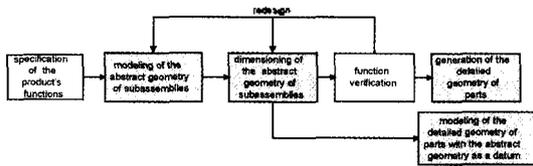
Fig. 10에서 각 기능 노드로부터 분화된 구조물 노드들을 그룹화한 요소를 볼 수가 있는데, 이것이 Fig. 3(d)의 상세화 레벨(level of detail)이다. 상세화 레벨은 설계 과정 상의 특정 시점에서 그때까지 최종적으로 분화된 구조물들간의 연결 관계를 표현한다.

Fig. 10(c)의 설계 과정 모델에서 색칠한 컴포넌트는 상세화 레벨이 하나 증가하더라도 새로운 구조물로 분화하지 않고 증가된 상세화 레벨에 남아 있는 경우인데 이웃한 커넥터의 구조 분화에 의해 노드간 링크의 변화가 생겼음을 알 수가 있다. 이처럼 상세화 레벨은 컴포넌트/커넥터의 수직적으로 변화하는 구조 분화 과정과 이에 따른 노드간 링크 변화를 표현하는 요소이다. 그리고 구조적으로 분화되지 않은 컴포넌트/커넥터를 증가한 상세화 레벨에 계속적으로 포함시킴으로써 그림의 색칠한 컴포넌트처럼 수직적으로 분화한 기능 노드들에 의해 중복적으로 사용될 수가 있다.

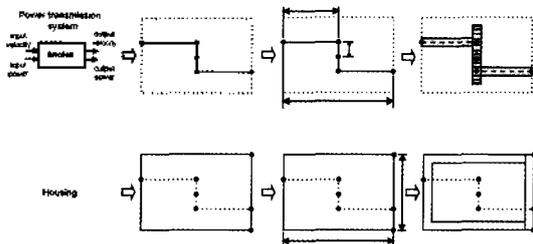
4. 형상 상세화 도구

4.1 형상 레이아웃

본 시스템에서는 내장된 형상 모델러를 이용하여 제품의 형상 레이아웃을 표현하는 개념 형상을 자유롭게 모델링할 수 있다. 형상 모델러의 주 역할은 설계자가 설계의 전체 레이아웃을 분화할 수 있도록 돕는 것이다. 이러한 방식으로 설계자는 설계 공간을 부조립체들로, 그리고 나서 요소 부품들로 분화시켜 나가는 과정을 반복적으로 수행하면서 설계를 진행할 수 있다. 형상 레이아웃은 보통 기능 모델러와 연계되어 Fig. 11(a)와 같이 기능 검증에 필요한 형상 입력을 제공한다. 개념형상은 치수 구속조건 관리자 모듈을 이용하여 변경되거나 상세화될 수 있다. 치수 구속조건을 변경함으로써 다양한 개념 형상 대



(a) functional design process



(b) evolution geometry

Fig. 11. Role of geometry in functional design of assemblies.

안들을 생성할 수 있다. 이러한 개념 형상들은 기능 검증 도구에 의해 검증됨으로써 주어진 요구 기능을 만족하는 개념 형상으로 발전한다. Fig. 11(a)의 상위 플로차트는 이러한 반복적인 설계 과정을 나타낸다. Fig. 11(a)의 하위 플로차트는 기능 검증이 없는 전통적인 상세 형상 모델링을 설명한다. 이 방식에서는 개념 형상이 단지 테이텀 형상으로만 이용된다. 두 방식 모두 본 시스템에서 지원된다. Fig. 11(b)는 기어 박스 설계에 두 방식을 각각 적용한 예로서 'power transmission system'에는 전자의 방식을, 'housing'에는 후자의 방식을 사용하여 형상을 발전시킨 것이다.

4.2 제품의 형상

4.2.1 제품의 개념 형상과 상세 형상

제품의 개념 형상은 위상학적으로 단 하나의 비다양체 모델로 표현된다^[16-19]. 결과적으로 각 부조립체/부품의 개념형상은 제품의 비다양체 모델의 일부가 된다. 이러한 방식으로, 구조 분화는 설계자가 단지 관심의 대상이 되는 분화된 구조물에 대해 원하는 형상 부분을 제품의 개념 형상에서 선택함으로써 쉽게 구현된다. 유사한 방식으로, 제품의 개념 형상에 살을 붙임으로써 얻어지는 상세 형상도 위상학적으로 하나의 비다양체 모델로 표현된다. 부품의 상세 형상을 합함으로써 얻어지는 이 모델을 병합체(merged-set)^[20,21]라고 부른다.

4.2.2 커넥터의 개념 형상

커넥터의 개념 형상은 설계자가 커넥터에 조인트를 위치와 방향 정보와 함께 지정할 때 간접적으로 지정된다. Fig. 12에 나타나 있는 것처럼 조인트 형상은 조인트 타입에 따라 조인트의 위치/방향을 가시화한다. 커넥터는 지정된 조인트의 개념 형상을 자

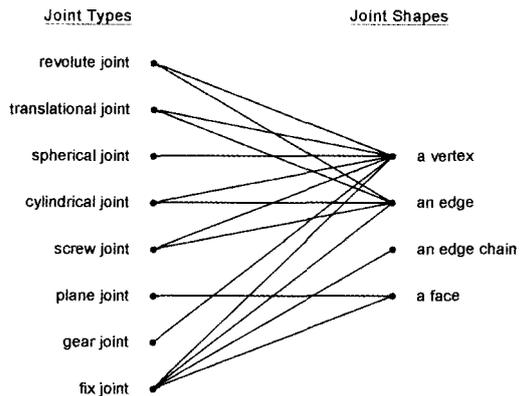


Fig. 12. Relationships between joint types and joint shapes.

산의 개념 형상으로 가지게 된다.

4.2.3 컴포넌트의 개념 형상

컴포넌트의 개념 형상은 제품의 설계가 진행됨에 따라 구성 부품 수 증가 등의 요인으로 인하여 점차 복잡한 형상으로 발전하게 된다. 그래서 설계 초기 단계일수록 컴포넌트의 정확한 개념 형상을 지정하기가 어렵다. 더욱이 개념 형상은 솔리드 만으로 이루어진 것이 아니라 점, 선, 면의 형상 요소가 혼재하므로 형상 요소가 추가될 때 마다 일일이 컴포넌트의 개념 형상으로 등록한다면 시간이 많이 걸릴 것이다.

이를 해결하기 위해 본 연구에서 컴포넌트의 개념 형상은 이웃한 커넥터의 개념 형상을 컴포넌트의 개념 형상의 경계로 가정하고 그 경계 형상에 의해 둘러싸인 개념 형상을 검색함으로써 결정된다. Fig. 13은 이 과정을 설명한다.

Fig. 13(a)의 기어 박스 설계 예에서 설계자는 'housing'과 'power transmission system'간에 네 개의 회전 조인트를 지정했다. Fig. 13(b)는 아직 설계가 많이 진행되지 않은 상태에서 두 회전축과 두 판으로만 이루어진 기어 박스의 개념 형상을 보여준다. 각 조인트의 형상이 모두 꼭지점으로 지정되어 있다. 이제 'power transmission system' 컴포넌트를 선택하고 이 컴포넌트의 가능한 후보 형상을 모두 찾게 하면 시스템은 'power transmission system' 컴포넌트에 연결된 네 개의 조인트로부터 조인트 형상인 꼭지점들을 입력 데이터로서 찾아내고 이들을 연결하는 형상을 찾음으로써 Fig. 13(c)와 같이 네 개의 셀 요소 그룹을 제시한다. 설계자가 'cell entity group 2'와 'cell entity group 3'을 지정하면 각 그룹의 경계를 구성하는 부분 꼭지점 정보를 찾아서 이를 Fig. 13(a)처럼 'power transmission system' 컴포넌트 내부에 출력 데이터로서 경계 부분 요소로 저장한다. 부분 꼭지점과 같은 부분 요소는 비다양체 상황을 다루기 위해 도입된 위상 요소이다^[19]. 이때 부분 요소를 저장하는 이유는 부분 요소가 부모 셀 요소(여기서는 꼭지점)에 대해 방향을 나타내기 때문이다. 즉, Fig. 13(c)처럼 셀 요소 그룹을 처음 탐색할 때는 각 꼭지점에 대해 양방향으로 모두 탐색을 시도해야 된다. 그런데 설계자의 선택에 의해 컴포넌트의 해당 셀 요소 그룹이 정해지면 (d)와 같이 설계가 더 진행되어 개념 형상이 발전한 상태에서도 변경된 개념 형상의 탐색을 위해서는 저장된 부분 꼭지점 방향으로만 탐색하면 된다. 조인트 형상이 모서리나 면 형태로 지정되어도 셀 요소/부분 요소 관계들이

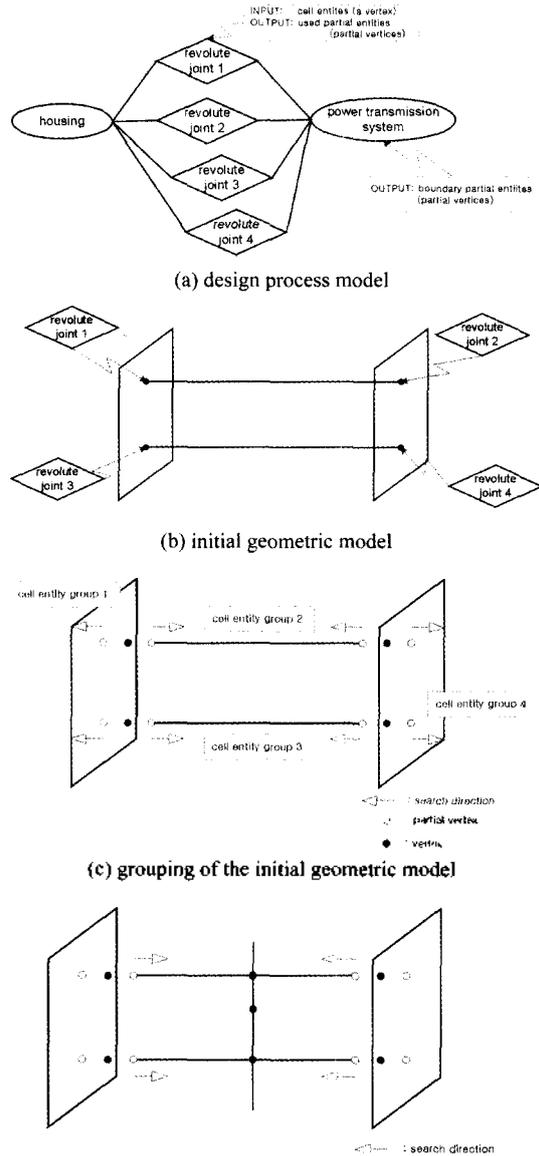


Fig. 13. Determination of abstract geometry from connectors.

용함으로써 똑같은 원리를 적용할 수 있다.

4.3 치수 기입 계획(dimensioning scheme)

제품의 개념 형상이 전부 혹은 일부가 결정되었을 때, 그것의 정확한 위치와 크기는 관련된 치수나 치수 구속조건들을 지정하고 그 결과로 생성된 구속조건 네트워크를 풀어서 개념 형상에 다시 반영함으로써 결정된다. 이 작업을 치수 기입 계획이라고 한다. 구

속조건 네트워크는 변이 형상 기법^[22-27]을 이용하여 풀린다. 본 시스템에서는 3차원에서의 형상 상세화 기능을 제공하기 위해서 주로 2차원 형상에 적용되던 변이 형상 기법을 3차원 환경으로 확장하였다.

치수 기입이 가능한 형상 요소는 3차원에서 정의된 점, 직선 그리고 평면이고 허용된 치수 구속조건은 두 형상 요소 간의 거리 구속조건, 각도 구속조건, 평행 구속조건, 직각 구속조건, 일치 구속조건 그리고 특정 형상 요소에 대한 고정 구속조건이다. 어떤 치수들은 설계자에 의해 직접 지정되고 반면에 어떤 치수들은 기능 검증 작업의 결과로서 기능 검증 도구에 의해 지정된다. 치수 구속조건 네트워크를 풀어서 결정되는 변수들은 각 허용 형상 요소 타입의 특성점들이다.

4.4 치수 기입 전략(dimensioning strategy)

치수 기입 계획을 제품 개념 형상 전체에 대해 단 하나만 지정할 경우 전체 치수 구속조건 네트워크를 동시에 푸는 것은 시간이 상당히 많이 걸릴 뿐 아니라 해가 수렴하지 않을 가능성도 있다. 그리고 하향 설계 방식에서는 보통 상위의 컴포넌트, 커넥터에 대해 부여된 치수나 치수 구속조건이 하위의 확장된 컴포넌트, 커넥터의 그것보다 우선 순위가 높은 경우가 많다. 혹은 비슷한 레벨상의 컴포넌트, 커넥터들에 지정된 치수나 치수 구속조건들이 서로에 대해 우선 순위가 독립적일 수도 있다. 그래서 본 연구에서는 제품에 대한 치수 기입 계획을 몇 개의 하위 치수 기입 계획의 조합으로 분화하고 이들간에 풀이 우선 순위를 지정할 수 있는 치수 기입 전략을 도입하여 제품의 전체 치수구속조건 네트워크 풀이에 대해 모듈화, 순차화를 통해 구속조건 네트워크 풀이의 효율성과 안정성을 높이하고자 한다. 사실, 치수 기입 전략은 설계자의 설계 의도를 암시한다. 치수 기입 전략을 지정하기 위해서는 Fig. 14에서처럼 먼저 구조적 모델이 설계 과정 모델로부터 구축된다. 치수 기입 전략은 지식 노드를 가지는 구조물 노드에 대해

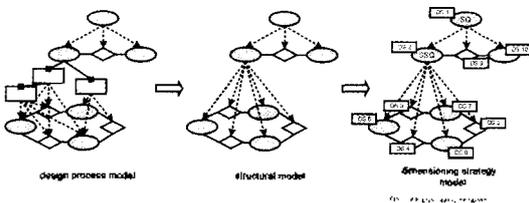


Fig. 14. Conversion from design process model to dimensioning strategy model through structural model.

서만 지정 가능한데, 그림에서 지식 노드를 가지는 두 개의 상위 구조물 노드에 대해 치수 기입 전략을 지정하면 각 구조물 노드에 지정되는 치수 기입 계획간에 풀이 우선 순위가 발생한다. 그림에서 'DS' 옆에 있는 숫자가 풀이 순서를 나타낸다.

치수 기입 전략의 의미 중 하나는 이러한 풀이 순서의 존재로 인하여 각 치수 기입 계획에 대해 그 계획을 수행할 시 참조할 수 있는 제품의 개념 형상의 범위가 달라진다는 것이다. 예를 들어, Fig. 14에서 'DS 9'의 경우 'DS 1'~'DS 8'의 구속조건 네트워크들을 먼저 풀어야 되고 그 결과로 각각의 치수 기입 계획에 해당하는 구조물 노드의 개념형상의 위치와 크기가 먼저 정해진다. 그리고 'DS 9'는 먼저 결정된 개념 형상들을 고정 형상으로 간주하고 이 형상들을 치수기입을 위한 기준 형상으로 사용할 수 있다. 즉 'DS 9'에 해당하는 개념 형상인 변경가능 형상과 앞의 치수 기입 계획들에 해당하는 개념 형상인 고정 형상간의 상대적인 치수 기입을 가능하게 한다. 고정형상이 의미하는 바는 치수 기입 계획 수행 시 강체운동 성분을 제거하기 위한 고정 구속조건 부여 작업이 필요 없다는 것이다. 모든 변화가능 형상은 고정 형상에 대해 상대적으로 위치가 정해지는 것이다.

Fig. 15에 본 시스템에서 지원하는 모든 종류의 치수 기입 전략이 예시되어 있다.

어떤 구조물 노드가 동시적 치수 기입 전략(SM)으로 지정되어 있다면 그 노드와 지식 노드들의 전체 개념 형상에 지정된 치수 구속조건 네트워크를 동시에 풀게 된다.

반면 어떤 구조물 노드에 순차적 치수 기입 전략(SQ)이 지정되어 있다면 지식 노드간의 순차적인 치

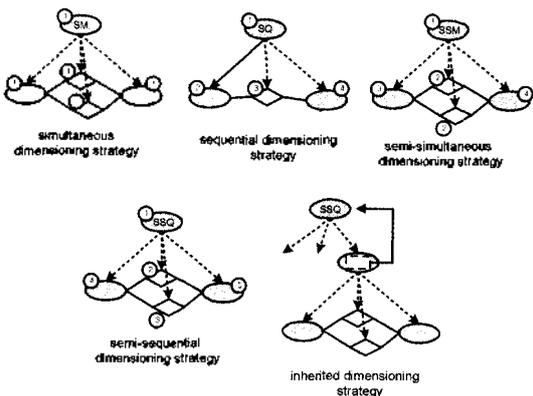


Fig. 15. Dimensioning strategies.

수 구속조건 네트워크 풀이를 가능하게 한다. 이 경우, 치수 구속조건 네트워크 풀이는 부모 노드에 대해 먼저 풀 다음, 설계자에 의해 지정된 기준 노드(그림에서 실선 화살표가 지정된 노드)로부터 시작하여 순차적으로 풀이가 이루어진다. 이 전략이 유효하기 위해서는 자식 노드들이 일련의 체인 형태이거나 별모양 구조(star structure)이어야 하고 루프 구조가 되어서는 안 된다.

중동시적 치수 기입 전략(SSM)에서는 부모 노드의 치수 기입 계획 풀이 후 자식 노드들 중 모든 커넥터들을 하나로 묶어서 하나의 치수 기입 계획 풀이를 수행하고 그 후 컴포넌트에 대한 치수 기입 계획 풀이를 한다.

순차적 치수 기입 전략(SSQ)에서는 부모 노드의 치수 기입 계획 풀이 후 자식 노드들 중 커넥터 그룹에 대해 순차적으로 치수 기입 계획 풀이를 수행하고 각 컴포넌트에 대해 치수 기입 계획 풀이를 한다.

상속된 치수 기입 전략(inherited dimensioning strategy)은 치수 기입 전략이 지정되지 않은 노드의 경우 그 부모 노드의 치수 기입 전략을 상속하도록 한다.

이러한 치수 기입 전략들은 치수 구속조건 네트워크의 국소 해(local solution)를 가능한 한 많이 이용할 수 있도록 하고 설계자의 다양한 설계 의도를 반영하기 위해서 제공된다.

5. 기능 검증 도구

Fig. 16은 두 개의 윈도우로 두 평판을 고정시키는 과정을 나타낸다. Fig. 16(a)는 설계 과정 모델을, Fig. 16(b)는 형상 모델을, 그리고 Fig. 16(c)는 기능 검증 모델을 나타낸다. 설계 과정 모델의 'level n'에서 두 평판을 연결된 'gravity fix' 커넥터에 'fix by gravity' 기능이 부여된다. 이 기능은 중력 효과에 의해 위판이 아래판에 고정되도록 한다. 'level n+1'에서 이 커넥터는 부여된 기능을 구현하기 위해 두개의 핀과 몇 개의 조인트를 가지는 새로운 구조물로 분화된다. 각각의 새로운 조인트에는 적절한 조인트 기능이 부여된다. 이들 조인트 기능은 허용 자유도(DOF)를 나타내는 기구학적 구속조건을 기능 데이터로 가진다. 핀의 경우 모든 컴포넌트의 상세 형상이 지정되지 않은 상태에서도 'gravity fix' 기능의 기능 검증은 Fig. 16(c)와 같이 구조 분화된 커넥터들의 기능 데이터만 참조함으로써 가능하다. Fig. 16에서 KC는 해당 기구학적 구속조건을 의미한다. 기능 검증 모델에서, 이러한 기구학적 구속조건을 이

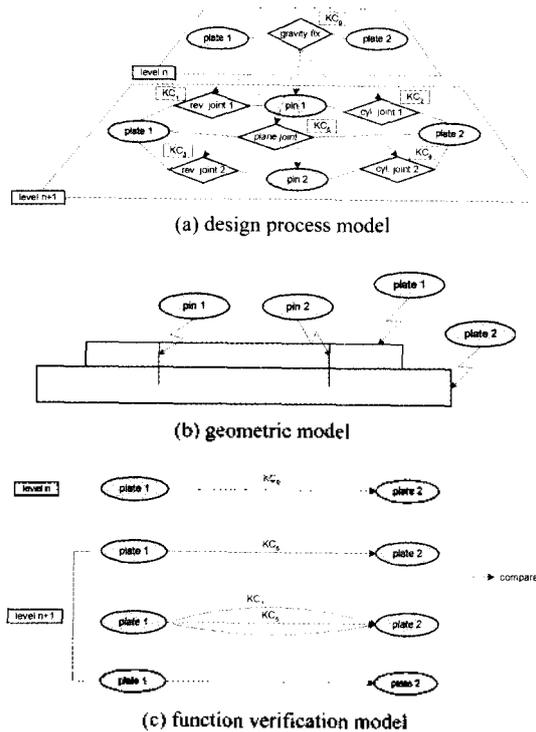


Fig. 16. Example of the function verification (function realization by functions).

용하여 'level n+1'상의 커넥터들에 대해 기구학적 체인이 구성된다. 기능 검증 여부를 확인하기 위해, 체인의 단순화된 최종 기구학적 구속조건이 커넥터에 부여된 'fix by gravity' 기능의 기구학적 구속조건과 비교된다. 이와 같이 기능 검증은 "조기 검증"(early verification)의 성질을 가진다. Fig. 16의 예는 특정 기능의 구현 여부를 검증하기 위해서 하부 구조물의 형상보다는 기능적인 요소를 고려하는 "기능에 의한 기능 구현(function realization by functions)" 방식이고, 이는 하향 설계에서 형상 설계의 비중이 적은 상위 설계 단계에서 주로 일어난다.

설계 과정이 진행됨에 따라 모든 컴포넌트의 상세 형상이 지정되면 'level n+1'상의 조인트 기능들이 검증될 수 있다. Fig. 17은 이 과정을 보여 준다. 'pin 1' 컴포넌트의 솔리드 형상이 제품의 병합체에 병합되면 두개의 인접한 컴포넌트간의 결합부 형상이 원래의 조인트 기능을 구현하는 지가 확인되어야 한다. Fig. 17(c)에서처럼 병합체로부터 접촉면들을 추출하고 그것들을 'fits'나 'against' 조건과 같은 정적 구속조건으로 변환한 후 이 조건들을 조합하여 조인트 기능의 구현 여부를 파악할 수 있다. 재설계 단계에

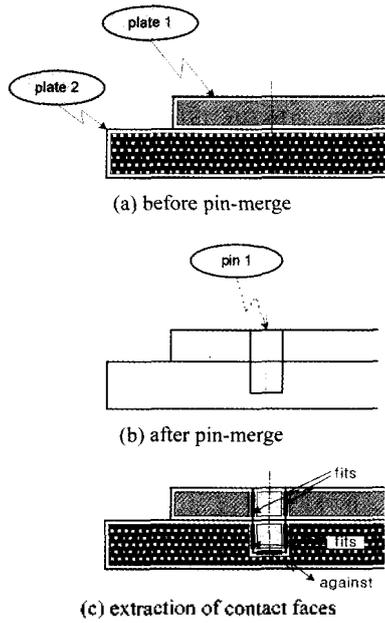


Fig. 17. Example of the function verification (function realization by geometry).

서 어떤 설계 변경은 이 부조립체에 부여된 기능들의 재검증을 요구하게 될 수도 있다. 이 경우, 'fix by gravity' 기능이 먼저 검증되고 그리고 나서 각 조인트 기능이 하향 회귀적인 방식으로 검증된다. 이와 같이 기능 검증은 "하향 회귀적 검증"(top-down recursive verification)의 성질을 가진다. Fig. 17의 예는 특정 기능의 구현 여부를 검증하기 위해서 구조물의 형상을 고려하는 "형상에 의한 기능 구현(function realization by geometry)" 방식이고, 하향 설계에서 중간의 개념 형상 설계 단계나 최하위의 상세 형상 설계 단계에서 주로 일어난다. 즉, 하향 설계는 "기능에 의한 기능 구현"에서 "형상에 의한 기능 구현"쪽으로 이루어지게 된다.

6. 적용 예: 기어 박스 설계

본 연구에서 구현된 시스템의 기능을 설명하기 위한 예제로서 기어 박스 설계 과정을 모델링하고자 한다. 앞에서 설명된 개념들이 이 적용 예를 통해서 입증될 것이다. Fig. 18은 사용자 인터페이스를 보여주고 있는데, 왼쪽에는 형상 레이아웃이, 오른쪽 위에는 설계 과정 모델이, 그리고 오른쪽 아래에 구조적 모델이 나타나 있다. 설계자는 설계가 진행됨에 따라 형상 레이아웃 뷰포트와 설계 과정 뷰포트 사

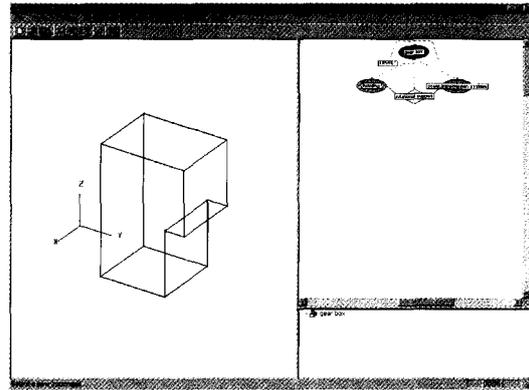


Fig. 18. Geometric layout and structure decomposition.

이를 오가게 된다. 구조적 모델은 변화가 있을 때 마다 시스템에 의해 설계 과정 모델로부터 자동으로 구해진다. 현재 화면은 제품을 나타내는 'gear box' 컴포넌트가 하우징 부조립체과 파워 전달 시스템 부조립체의 두 컴포넌트로 구조적으로 분해되고 있는 것을 보여 준다. 분해된 두 구조물은 'rotational support'라는 이름을 가진 커넥터에 의해 연결된다. 동시에 내장된 형상 모델러 모듈에 의해 제품의 개념 형상이 모델링된다.

Fig. 19는 설계자가 설계 과정 모델 뷰포트 상에서 'rotational support' 커넥터를 네 개의 커넥터인 'revolute joint 1', 'revolute joint 2', 'revolute joint 3', 그리고 'revolute joint 4'로 분화 시키는 모습을 보여 준다. 동시에, 형상 레이아웃 뷰포트 상에서 이들 커넥터들의 개념 형상이 파워 전달 시스템의 초기 개념 형상으로 이미 스케치 된 수평 축들의 끝점으로 정의 된다. 형상 요소들은 부분 꼭지점의 개념을 이용하여 이들 끝점에서 분리되고 시스템

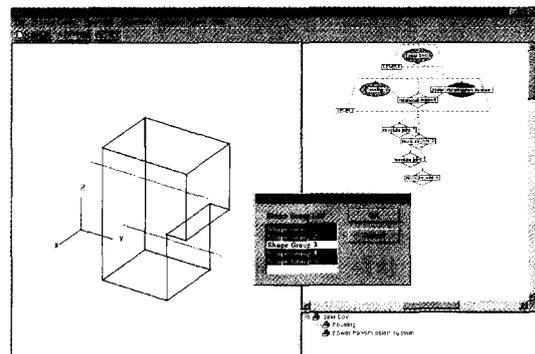


Fig. 19. Determination of the abstract geometry of sub-assembly.

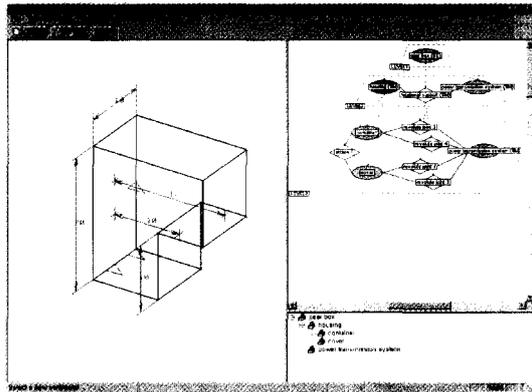


Fig. 20. Dimensioning of housing.

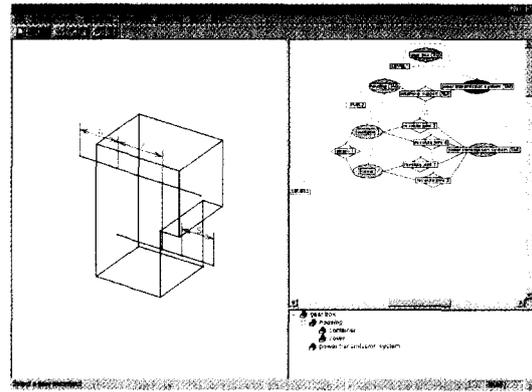


Fig. 21. Dimensioning of power transmission system with respect to fixed housing & revolute joints geometry.

에 의해 다섯 개의 분리된 형상 요소 그룹이 구해진다. 그리고 나서 설계자는 적당한 형상 요소 그룹들을 'power transmission system' 컴포넌트의 개념 형상으로 선택한다. 본 시스템의 이 기능은 커넥터들이 추가될 때 자동으로 구조물을 분화 시킴으로써 구조 분화 과정을 용이하게 한다.

Fig. 20은 'housing' 노드에 치수를 지정함으로써 형상을 상세화 하는 과정을 보여 준다. 'gear box' 컴포넌트의 치수 기입 전략이 순차적 치수 기입 전략(SQ)이고 'housing' 컴포넌트가 기준 노드로 선정되었기 때문에 'gear box' 컴포넌트의 자식 노드 중 풀이 우선 순위가 가장 높다. 그래서 치수 기입 시, 풀이 우선 순위가 나중인 'rotational support' 커넥터와 'power transmission system' 컴포넌트의 개념 형상을 참조하지 못하도록 시스템은 화면상에서 이 두 노드의 개념 형상을 숨긴다. 'housing' 노드의 치수 기입 계획이 전체 치수 기입 계획들 중 첫 번째이기 때문에 그림과 같이 공간상에서 강체 운동 성분을 없애는 고정 구속 조건을 부여해야 한다. 설계자는 치수를 지정하고 시스템은 구속조건 네트워크를 풀어서 개념 형상을 갱신한다.

Fig. 21은 하우징과 회전 조인트들의 위치가 결정된 후 파워 전달 시스템의 위치가 어떻게 정해지는지를 보여 준다. 'gear box'의 치수 기입 전략이 SQ이므로 자식 노드인 'housing', 'rotational support' 그리고 'power transmission system'에 치수가 순차적으로 지정된다. 즉, 'power transmission system' 노드에 해당하는 개념 형상의 위치는 'housing'과 'rotational support'의 형상이 고정된 것으로 가정함으로써 상대적으로 결정된다. 그래서 'power transmission system' 노드의 개념 형상으로 지정된 박스

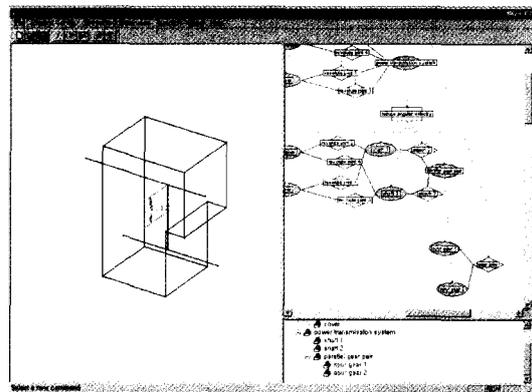


Fig. 22. Verification result of the 'reduce angular velocity' function.

내부의 와이어 형상만이 치수들에 의해 변경 가능한 형상이다.

Fig. 22는 'power transmission system' 노드에 감속 기능을 부여하기 위해서 'reduce angular velocity' 기능 노드를 생성하고 이 기능을 구현하는 구조물을 분화한 후 기능을 검증한 결과이다. 기능 검증의 결과로서 주어진 감속비를 만족하는 기어 쌍의 반지름 비가 계산에 의해 결정되고 각 기어의 반지름이 그림과 같이 치수 형태로 개념 형상에 자동으로 반영된다.

Fig. 23은 'reduce angular velocity' 기능 노드에서 수직 기능 분화된 'transmit constant power' 기능을 검증함으로써 파워 전달 시스템을 구성하는 부품들의 슬리드 형상을 제품 형상에 더하는 과정을 보여 준다. 검증 과정은 내부적으로 각 부품에 대한 강도 해석을 수행하며 해석시 상위의 'reduce angular velocity' 기능의 기능 데이터를 참조한다. 'transmit

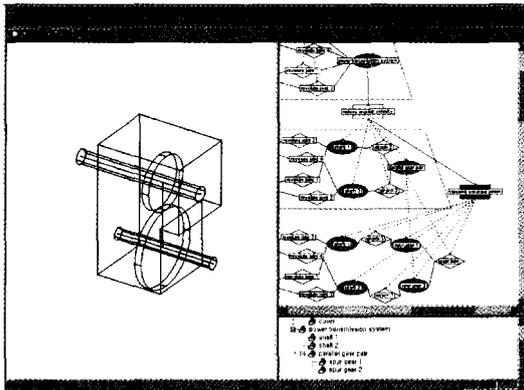


Fig. 23. Verification result of the 'transmit constant power' function.

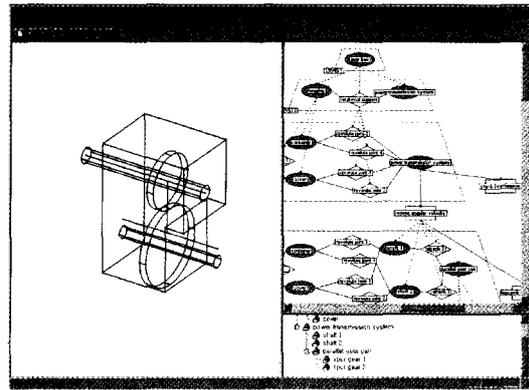


Fig. 25. Modification result of the abstract geometry of gear box product.

constant power' 기능과 기능 검증 도구를 부여함으로써 보통 설계자가 직접 수행하는 기어의 두께, 축의 지름과 같은 크기를 결정하기 위한 계산들이 시스템이 관리하는 설계 과정 속에 포함될 수 있다. 이 메커니즘을 이용하여 크기를 계산하는 작업은 재설계 단계에서 자동으로 수행될 수 있다.

Fig. 23으로부터, 솔리드 부품 중 아래쪽 기어가 'housing' 부조립체의 개념 형상과 간섭이 생기는 것을 알 수 있다. 이러한 간섭은 보통 설계자에 의해 시각적으로 파악될 수 있다. 그러나, 이 간섭 확인 과정은 Fig. 24에서처럼 'power transmission system' 노드에 'check interference' 기능을 수행 기능 분화 시킴으로써 재설계 단계에서 자동으로 재 수행될 수 있다. 만약에 간섭이 발생하면, 설계자는 Fig. 25과 같이 제품의 개념 형상에서 두 축간의 거리를 줄이는 방법으로 간섭을 없앨 수 있다. 이것은 축간 거리를 규정하는 회전 조인트의 위치에 관련된 치수를 변화 시킴으로써 쉽게 수행할 수 있다. 회전 조인트

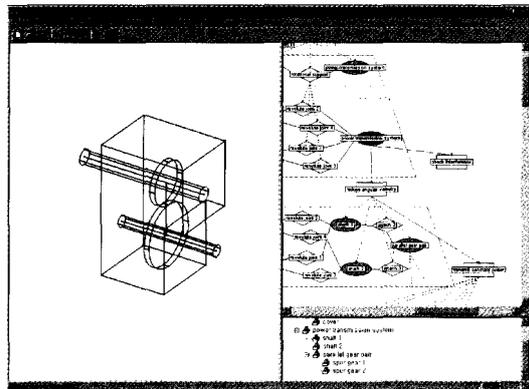


Fig. 26. Verification result of the 'power transmission system' subassembly's functions.

의 위치를 수정함으로써 이에 영향을 받는 파워 전달 시스템의 개념 형상도 자동으로 갱신된다.

축의 새로운 위치에 대해 시스템으로 하여금 'power transmission system' 노드에 부여된 모든 기능들을 하향 회귀적으로 재 검증하도록 하면, 'reduce angular velocity', 'transmit constant power' 그리고 'check interference' 순으로 자동으로 기능 검증 도구가 실행된다. 그리고 나서 구성 부품들의 상세 형상이 갱신되고 결과적으로 Fig. 26와 같이 간섭이 없는 구조물이 된다.

7. 결 론

본 연구에서는 하향 방식의 기능 및 구조 분화를 지원하는 설계 과정 모델러를 제안하였다. 이것은 설계 대상물 뿐만 아니라 설계 과정까지 모델링하고 설계자의 설계 검증 행위를 저장하여 재설계 과정을

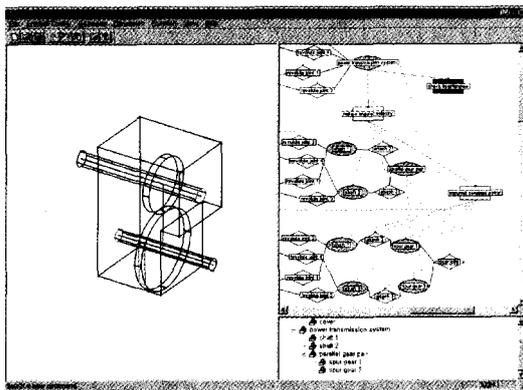


Fig. 24. Verification result of the 'check intereence' function.

자동화 시킨다. 본 시스템은 비다양체 모델링, 변이 형상 그리고 구조 분화와 형상 상세화 과정에 대한 파라미터 설계 기법 등의 기존 기술들을 결합시켰다. 내장된 기능 분화 도구는 특히 기계 설계 초기 단계에서 강력한 기능 설계 시스템이 되도록 한다. 본 시스템은 또한 부품 중심의 시스템이 아닌, 부품의 기능보다 제품의 기능이 먼저 만족되는 조립체 중심의 시스템이다. 따라서 재설계 단계에서 부품의 상세 형상을 변경하는 노력을 줄여 준다.

본 시스템의 구성 모듈 중 제품 구성 생성자, 형상 모델러 그리고 치수 구속조건 관리자 모듈은 다양한 설계 영역에서 공통적으로 사용될 수 있는 반면에 기능 모델러에서 지원하는 기능과 기능 검증 도구는 설계 영역이 바뀔 때 따라 시스템에 코드화 되어야 한다. 그러므로 본 시스템의 능력은 내장된 기능과 기능 검증 도구의 다양성에 따라 발휘될 것이다. 이때 기능 내부에 기능 검증 도구를 포함시키고 재설계 단계에서 이를 하향 회귀적으로 수행함으로써 반복적 설계 과정에서 필연적으로 발생하는 설계자의 지루한 작업들을 줄일 수 있을 것이다.

현재의 시스템은 전적으로 설계자와의 상호작용을 통해 동작한다. 전문가 시스템과는 달리 설계 영역에 따른 적절한 설계 지식을 자동으로 제공하지는 않는다. 궁극적으로는 기능 검증 도구가 기능 클래스 객체에 포함되는 것과 유사한 방식으로 설계 지식이 이 객체에 코드화 되는 것이 바람직하다. 이것은 재설계 단계에서 요구 기능이 만족되지 않을 때 적절한 진단 정보나 재설계 권고안이 설계자에게 제공되도록 도와줄 것이다. 만일 구조 분화나 기능 분화에 대한 권고안을 제공할 수 있다면 더 이상적일 것이다. 이러한 기능을 추가함으로써 본 시스템은 지능적 CAD 시스템으로 한단계 더 발전하게 될 것이다.

더 나아가 제품의 실제에 여러 설계자가 관련되고 이들 설계자가 네트워크 상에 분산되는 추세를 감안하면 설계 과정 모델 및 제품의 형상 모델을 공유하면서 각자가 맡은 기능 구현을 각자의 컴퓨터에서 처리할 수 있도록 모든 기능 클래스 객체를 분산 객체화시키는 작업이 필요할 것이다. 이러한 개념까지 본 시스템이 확장된다면 지능적 분산 CAD 시스템으로서 더욱 실제 설계 환경에 근접하게 될 것이다.

후 기

본 연구는 교육부의 학술 연구 조성비 지원(97.7.1~98.6.30)으로 수행되었다.

참고문헌

1. Libardi Jr, E.C., Dixon, J.R. and Simmons, M.K., "Computer environments for the design of mechanical assemblies: A research review", *Engineering with Computers*, Vol.3, pp. 121-136, 1988.
2. Sodhi, R. and Turner, J.U., "Towards modeling of assemblies for product design", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 2, pp. 85-97, 1994.
3. Mantyla, M., "Modeling system for top-down design of assembled products", *IBM Journal of Research and Development*, Vol. 34, No. 5, pp. 636-659, 1990.
4. Gui, J.-K. and Mantyla, M., "Functional understanding of assembly modeling", *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 6, pp. 435-451, 1994.
5. Horvath, I., Thernesz, V. and Bagoly, Z., "Conceptual design with functionally and morphologically parameterized feature objects", *Proceedings of the Computers in Engineering Conference and the Engineering Database Symposium*, ASME, pp. 507-516, 1995.
6. Deng, Y.-M., Tor, S.B. and Britton, G.A., "A computerized design environment for function modeling of mechanical products", *Proceedings of Fifth Symposium on Solid Modeling and Applications*, Ann Arbor, MI, USA, 1999.
7. Gortie, S.R. and Sriram, R.D., "From symbol to form: a framework for conceptual design", *Computer-Aided Design*, Vol. 28, No. 11, pp. 853-870, 1996.
8. Szykman, S. and Kim, J.H., "Interactive Exploration and Optimization in Assembly Design", *Proceedings of 1996 ASME Int. Conf. on Design Automation*, Irvine, CA, USA, 1996.
9. Pahug, E., Senin, N. and Wallace, D., "Distribution modeling and evaluation of product design problems", *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 6, pp. 411-423, 1998.
10. Freeman, P. and Newell, A., "A model for functional reasoning in design", *Proceedings of the Second IJCAI*, Los Altos, CA, USA, pp. 621-633, 1971.
11. Bowen, J., "Automated configuration using a functional reasoning approach", *Artificial Intelligence and its applications*, Cohn, A.G., Thomas, J.R. (Eds.), New York, John Wiley & Sons, pp. 79-106, 1986.
12. Wolter, J. and Periannan, C., "Knowledge representation for functional design of mechanical assemblies", *Proc. 1991 NSF Design & Manufacturing Systems Conf.*, Austin, TX, USA, pp. 633-639, 1991.
13. Pahl, G. and Beitz, W., *Engineering Design: A Systematic Approach*, Springer Verlag, 1988.
14. Kirschman, C.F., Fadel, G.M. and Jara-Almonte, C.C., "Classifying functions for mechanical design", *Proceedings of The 1996 ASME Design Engineering Technical Conference and Computers in Engineering Conference*, Irvine, California, August 18-22, 1996.
15. Rumbaugh, J., Blaha, M., Premerlani, W., Eddy, F.

- and Lorensen, W., *Object-Oriented Modeling and Design*, Prentice Hall, 1991.
16. Weiler, K., *Topological Structures for Geometric Modeling*, PhD Thesis, Rensselaer Polytechnic Institute, August 1986.
 17. Choi, Y., *Vertex-based boundary representation of non-manifold geometric models* PhD Thesis, Carnegie Mellon University, 1989.
 18. Yamaguchi, Y., Kobayashi, K. and Kimura, F., "Geometric modeling with generalized topology and geometry for product engineering", *Product Modeling for Computer-Aided Design and Manufacturing*, Turner, J., Pegna, J. and Wozny, M. (Eds.), Elsevier Science Publishers B.V., North-Holland, 1991.
 19. Han, Y.H., Lee, K., Kim, Y.J., Lee, G.S., Hong, J.W., Ahn, J.H., Hur, J.H., Lee, K.J., Lee, S.H. and Kim, S.H., "A framework in developing kernel modeler based on nonmanifold boundary representation", *Pacific Conference on Manufacturing 96*, Seoul, Korea, October 29-31, 1996.
 20. Masuda, H., Shimada, K., Numao, M. and Kawabe, S., "A mathematical theory and applications of non-manifold geometric modeling," *Geometric Modeling for Engineering Applications*, Krause, F.L. and Jansen, H. (Eds.), North-Holland, 1990.
 21. Crocker, G.A. and Reinke, W.F., "An editable non-manifold boundary representation", *IEEE Computer Graphics & Applications*, March, 1991.
 22. Hillyard, R.C. and Braid, I.C., "Analysis of dimensions and tolerances in computer-aided mechanical design", *Computer-Aided Design*, Vol. 10, No. 3, pp. 161-166, 1978.
 23. Light, R. and Gossard, D., "Modification of geometric models through variational geometry *Computer-Aided Design*", Vol. 14, No. 4, pp. 209-214, 1982.
 24. Lin, V.C., Gossard, D. and Light, R., "Variational geometry in computer-aided design", *ACM Computer Graphics*, Vol. 15, No. 3, 1981.
 25. Sunde, G., "A CAD system with declarative specification of shape", *EuroGraphics Workshop on Intelligent CAD Systems*, April, 1987.
 26. Aldefeld, B., "Variation of geometry based on a geometric-reasoning method", *Computer-Aided Design*, Vol. 20, No. 3, 1988.
 27. Owen, J.C., "Algebraic solution for geometry from dimensional constraints", *Symposium on Solid Modeling Foundation and CAD/CAM Applications*, Austin, Texas, June, 1991.

홍진웅



1991년 서울대학교 기계설계학과 학사
 1993년 서울대학교 기계설계학과 석사
 1999년 서울대학교 기계설계학과 박사
 1999년-현재 삼성SDS(주) CAD사업팀
 관심분야: Top-down functional design, Engineering application integration, Virtual enterprise

이건우



1978년 서울대학교 기계공학과 학사
 1981년 미국 M.I.T. 기계공학과 석사
 1984년 미국 M.I.T. 기계공학과 박사
 1984년-1986년 미국 Univ. of Illinois at Urbana-Champaign 조교수
 1986년-현재 서울대학교 기계항공공학부 교수
 관심분야: 다중해상도 모델링 커널, 가상현실, Rapid Prototyping, Custom-made shoe design
