제품개발 초기단계의 생산공정설계를 위한 기계부품의 외형형상 합성에 관한 연구

임진승*(성균관대 대학원 기계설계학과), 김용세 (성균관대 기계공학부)
에릭왕 (성균관대 기계기술 연구소 및 KIST CAD/CAM 연구센터)

A Study on Part Configuration Shape Synthesis for Process Planning in the Early Design Stage

J. S. Lim* (Dept. of Mech. Eng, Sungkyunkwan Univ.), Y. S. Kim (School of Mech. Eng, Sungkyunkwan Univ.)
E. Wang (Inst. of Adv. Mach. & Tech., Sungkyunkwan Univ. & CAD/CAM Research Center, KIST)

ABSTRACT

Tight integration of product design and process planning in the early design stage would make bigger impact as wider spectrum of design and manufacturing alternatives can be pursued and evaluated. Thus the development of systematic computer-based support for this integration is desirable. For this integration and process planning in the early design stage, the systematic method to synthesize shape of part from functional requirements is crucial. This research presents the methods of functional decomposition from overall function of product and synthesizing shape of part based on functional relations extracted from functional decomposition using planetary gear transmission system as an example.

Key Words : Early design stage (제품개발 초기단계), Top-down functional design (하향적 기능설계), Functional relation (기능적 관계), Functional Interface (기능수행 부위), Shape Synthesis (형상합성), Planetary gear transmission system (플래닛 기어 시스템)

1. 서 론

제품개발 초기단계가 차지하는 비중은 매우 크다. 더욱이 제품개발 초기 단계에서의 제품에 대한 개념적 공정설계의 수행은 우수한 품질과 비용 효율적인 생산에 큰 영향을 줄 수 있으며 상세개발 단계에서 발생될 수 있는 여러 가지 오류 등을 사전에 감소시키거나 방지할 수 있게 한다. 즉 제품개발 초기단계에서의 제품설계와 공정설계의 통합은 보다 폭 넓은 설계와 생산 상의 대안을 추구하고 평가할 수 있기 때문에 더욱 큰 효과를 가져올 수 있다.[1] 따라서 제품개발 초기단계에서의 제품설계와 개념적 공정설계의 통합을 위한 컴퓨터 원용 지원 시스템의 개발이 필요하며, 개념적 공정설계를 수행하기 위하여, 제품에 대한 기능적 요구조건 (Functional Requirements) 으로부터 제품의 개념적 형상 (Conceptual Shape) 을 합성 (Synthesis) 할 수 있는 방법론의 개발이 필요하다. 이에 본 연구에서는, 제품에 대한 기능적 요구조건으로부터 제품이 수행해야 할 상세 기능들을 세분화하고 그 세분화된 기능들로부터 제품의 형상이 합성되어가는 일련의 과정들에 대한 방법론을 소개한다. 본 연구에서는 기계부품의 4 가지 기본 기능 그룹[2] 의 기능들을 사용하여 제품에 대한 하향적 기능설계를 수행하였으며, 이로부터 형상합성을 하고자 하는 부품에 관련된 기능적 관계를 추출해내고, 이들 각각의 기능적 관계를 수행하는데 요구되는 기능수행 부위의 형상을 설계하여 통합 형상화함으로써 부품의 의도된 기능을 반영할 수 있는 개념적인 부품의 형상을 합성해가는 방법론을 제시한다. 본 방법론을 적용하는 예제로는, 회전체의 회전 속도를 변경/전달하는 총체적 기능을 수행하는 플래닛 기어 시스템을 사용하였다.

2. 플래닛 기어 시스템의 기능 설계

2.1 기능 설계의 기본 개념

제품을 설계하는 데에는 크게 2 가지 형태의 방식이 있다. 첫번째는, 현대 CAD 시스템이 제공하는 막강한 부품 설계기능에 기반한 상향식 설계 (Bottom-up Design) 방식으로 부품의 형상을 설계한 후 이들을 조립하여 하나의 제품으로 구성 (Assembly Modeling) 하는 것이고, 두번째는 추상적인 기능적 요구조건을 구체적인 하위 기능들로 분화 (Decomposition) 하여 최하위 기능들에 대한 부품의 형상을 설계하는 하향식 설계 (Top-down Design) 방식이다.[3] 후자의 경우는 제품개발 초기단계, 즉 개념설계 단계에서 적용될 수 있다. 이러한 하향식 설계 방식을 사용하기 위하여는 제품의 기능을 표현하는 체계화된 분류체계가 필요하며, Kirschman 등은 기계제품의 기능들을 Motion, Control, Power/Matter, 그리고 Enclosure 의 4 가지 기본 기능그룹으로 분류하였으며[2], Table 1 의 우측에 표시된 단어들을 조합하여 기계부품의 기능을 표현할 수 있게 하였다.

Table 1. Basic Function Group [2]

Function	Description
Motion	- **Rotary**, Linear, Oscillatory, Other - Create, Convert, Modify, **Transmit** - Flexible, Rigid
Control	- Power, Motion, Information - Continuous, Discreet - Modification, Indication
Power/ Matter	- Store, Intake, Expel, Modify, Transmit - Electrical, Mechanical, Other
Enclosure	- Cover, View, Protect - Removable, Permanent - **Support**, **Attach**, Connect, **Guide**, Limit

본 연구의 궁극적인 목표는 제품개발 초기단계에서의 공정설계를 실현하기 위한 부품의 개념적 형상을 합성하기 위한 것으로, Table 1 에 굵게 강조된 기능들을 사용하여 하향식 기능설계를 수행하였다.

2.2 기능 설계

제품의 기능설계 결과와 제품의 형상과의 관계를 컴퓨터 시스템 상에서 연결하기 위하여는 기능설계 단계에서부터 기능과 관련된 데이터 구조를 갖추고 있어야 한다. Gui[4] 등은 하향식 기능설계를 위한 컴퓨터 시스템을 제안하였다. 이 시스템에서 표현되는 개념적 조립체는 멀티그래프 구조 (Multi-Graph Structure) 로 구조화되며, 그래프의 각 노드는 부품을 나타내는 컴포넌트 (Component) 또는 컴포넌트들 간의 조립관계를 나타내는 커넥터 (Connectors) 로 표현한다. 홍진웅[5] 은 Gui[4] 등이 제안한 멀티그래프 구조를 이용하여 기계제품의 하향식 설계 및 설계과정을 모델링할 수 있으며, 더불어 기능설계의 진행 단계마다 비다양체 모델을 사용하여 하향식으로 제품의 형상설계를 수행할 수 있는 시스템을 제안하였다. 그러나 이상의 연구들은 제품개발 초기단계에서의 공정설계를 수행할 수 있는 수준을 갖는 부품의 형상합성보다는 조립체의 조립관계와 설계과정을 모델링하는데 중점을 둔 것이다.

Gui[4] 등이 제안한 멀티그래프 구조는 본 연구의 기능설계 방법론의 개발에 동기가 된 것으로, 이를 더욱 확장하여 활용하고자 Fig. 1 에 도시한 바와 같이 4 개의 설계요소를 정의하였다. 괄호 형태로 표현된 요소는 제품의 총체적 기능을, 사각형의 설계요소는 기계부품이 수행하는 기능의 입력과 출력 요소를 표현하기 위한 것이다. 그리고 다이아몬드와 타원의 설계요소는 각각 부품간의 기능적 관계와 기계부품을 나타낸다.

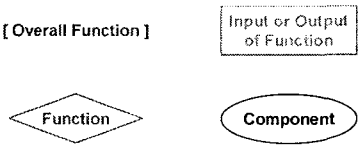

Fig. 1 Design Entities for Functional Design

본 연구의 예제로 사용된 플래닛 기어 시스템은 외부로부터 회전운동을 입력으로 하여 링기어, 플래닛 기어, 그리고 썬기어의 조합에 의하여 속도비를 변환하여 다시 회전운동으로 출력해주는 기계장치이다. 본 연구에서는 플래닛 기어의 총체적 기능을 "Transmit Rotary Motion to Rotary Motion"으로 정의하였으며, 여러 가지 작동 모드 중 회전속도를 증가시키는 증속 모드를 선정하여 기능설계를 수행하였다. Fig. 2 에 플래닛 기어 시스템의 증속 메카니즘를 간략히 도식화하였다. 회전 속도를 증가시키기 위해서는 외부로부터의 회전운동이 (a) 스플라인 축을 통하여 (b) 캐리어로 전달되고, 이어 캐리어의 회전운동은 (c) 플래닛 기어의 회전운동으로 전달되는데, 이때 썬기어를 고정 상태로 두면, 플래닛 기어는 자전과 공전을 병행하게 되며, 이에 연결되어 있는 (d) 링기어가 회전하게 되어 출력으로 회전운동을 전달하게 된다. 여기서 썬기어는 고정되어 있는 상태로 플래닛 기어의 회전운동을 안내 (Guide) 하는 기능을 수행하기 때문에, 운동의 전달경로를 나타내는 메커니즘에는 표현되지 않는다.

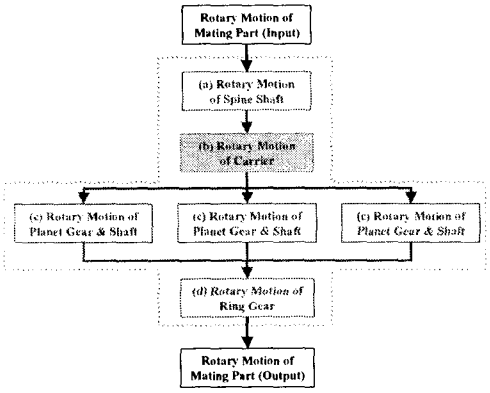

Fig. 2 Mechanism of Planetary Gear Transmission System for Speed-up

Fig. 3 에는, 본 연구에서 정의된 4 개의 설계요소를 사용하여 플래닛 기어 시스템이 회전운동을 전달하기 위한 기능을 수행할 수 있는 가장 간단한 개념적인 기능설계를 수행하여 나타내었다. 기능분화를 수행하기 위하여 정의된 "Transmit Rotary Motion to Rotary Motion"의 총체적 기능으로부터, 회전운동의 입력과 이를 다시 회전운동의 출력으로 전달(Transmit) 해 주는 기능으로 구체화 할 수 있으며 입력의 회전운동을 수행하는 기계요소와 출력의 회전운동을 수행하는 기계요소를 각기 스플라인 축과 링기어로 선정할 수 있다. 여기서 스플라인 축의 회전운동을 링기어의 회전운동으로 전달하기 위하여 전달기능은 다시 캐리어를 통한 회전운동의 전달로 세분화될 수 있으며, 캐리어로부터 링기어로의 회전운동의 전달은 다시 플래닛 축과 기어를 통하여 전달될 수 있도록 기능분화하였다. 도시한 바와 같이, 기능분화와 기능수행의 방향은 각기 "점선+화살표"와 "실선+화살표"로 그리고 입/출력과 이를 수행하게 되는 부품간의 연관성은 "원+실선+원"의 관계요소를 사용하여 표현하였다. 여기서 전달기능은 "기능-모션-기능"의 형태로 분화될 수 있는데 분화된 2 개의 좌우 하위 기능 중 적어도 하나는 상위 기능의 표현을 그대로 사용하도록 하였으며 나머지 하위 기능은 Enclosure 그룹의 기능을 사용할 수 있다.

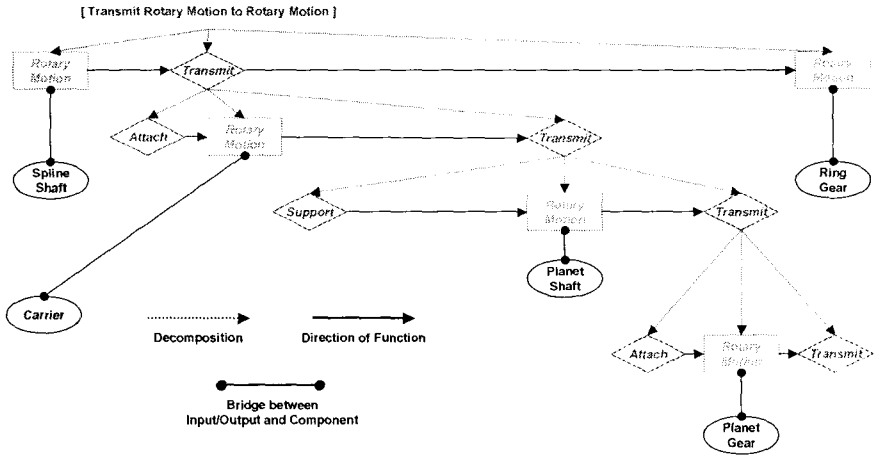

Fig. 3 Functional Design of Planetary Gear Transmission System for Speed-up

앞서 언급한 바와 같이, 증속 모드에서 썬기어는 회전운동의 전달기능에 있어 직접적인 기능을 수행하지 않기 때문에 Fig. 3 에 도시한 기능설계도에는 포함되어 있지 않다. 그러나 플래닛 기어의 회전운동을 안내 (Guide) 하는 기능의 필요에 의하여 썬기어를 기능설계에 포함시킬 수 있으며, 다시 썬기어는 캐리어의 지지를 받는 썬기어 축에 고정되어 안내 기능을 수행할 수 있다. 이상의 기능설계에 대하여 보다 세부적으로 기능분해를 수행할 수가 있는데, 최종적인 기능설계 결과를 Fig. 4 에 도시하였다. 캐리어로부터 플래닛 축으로의 회전운동 전달기능의 하위 기능인 지지 (Support) 기능은 다시 "고정-베어링-지지"로 분화될 수 있다. 여기서 베어링에 의한 지지는 2 개의 베어링에 의하여 축의 양단을 지지하도록 하였다. 다시 회전운동을 하는 플래닛 기어의 개수를 3 개로 정의를 하면, 이에 따라서 2 개의 플래닛 축과 2 개의 베어링 쌍이 추가로 필요하게 된다. 이와 동일하게 캐리어에 의한 썬기어 축의 지지는 축의 한쪽 단만을 베어링에 의해 지지되도록 기능분화를 수행할 수 있다.

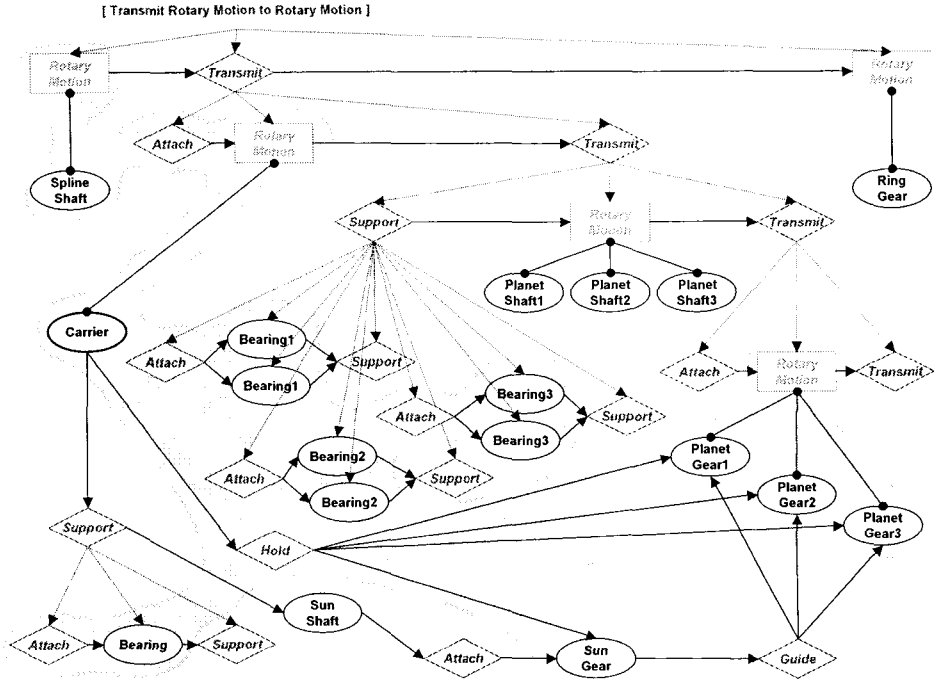

Fig. 4 Final Functional Design of Planetary Gear Transmission System for Speed-up

Fig. 4 에 표현된 안기 (Hold) 의 기능은 기어와 같이 회전운동을 하는 부품과의 간섭이 없으면서, 운동을 위한 공간제공 기능을 표현한다.

3. 플래닛 기어 캐리어의 형상 합성

3.1 기능적 관계 추출

수행된 기능설계의 결과로부터 임의의 부품을 선정하여 형상합성을 수행하기에 앞서, 형상합성을 위한 기본적인 개념의 소개가 필요하다. 첫번째로는 기계부품의 기능은 그 부품이 조립체의 구성 부품일 경우에만 의미를 갖는다는 것이다. 따라서 2.2 절에서 수행된 것과 같은 기능설계의 과정에서 부품이 수행해야 할 의도기능이 부여될 수 있으며, 더불어 기능분화를 통하여 각 부품의 의도기능이 구체화/세분화될 수 있다는 것이다. 그리고 모든 기계부품은 다음과 같이 2 개의 개념적 부분으로 구분할 수 있다.

- *기능수행 부위* (*Functional Interface*, 이하 *FI*) : 조립체 내에서, 부품의 의도기능이 실제로 수행되도록 하는 경계부분.
- *기능통합 부위* (*Function Bridge*, 이하 *FB*) : 조립체 내에서, 부품에 요구되는 총체적 의도기능을 수행할 수 있도록 기능수행 부위들을 통합하여 실제 부품의 형상을 갖도록 하는 부분.

부품형상의 합성은 수행된 기능설계도에서 대상 부품을 선정함으로써 시작될 수 있는데, Fig. 4 의 녹색 영역은 캐리어의 기능과 그 기능에 의하여 연관성을 가지고 있는 부품을 강조하여 나타낸 것이다. Fig. 5 에는 Fig. 4 에 영역으로 강조된 부분의 정보들이 추출되어 재구성된, 캐리어의 기능적 관계 구조를 도시하였다. 이와 같은 기능적 관계 구조의 추출은 Gui 등[4] 이 제안한 다중그래프 구조를 사용함으로써 가능하다.

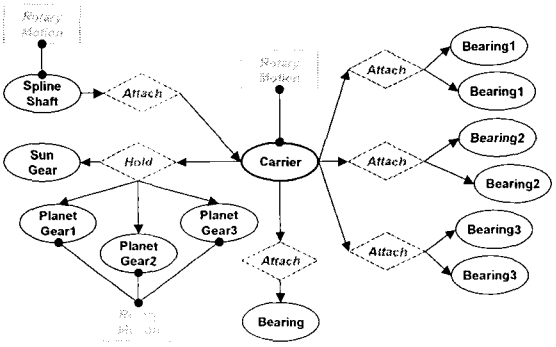

Fig. 5 Extracted Functional Relations of Carrier

3.2 기능수행 부위 설계

추출된 캐리어의 기능적 관계로부터 캐리어의 형상을 합성하기 위하여, 각각의 기능적 관계에 대한 기능수행 부위를 설계하여야 한다. 기능수행 부위는 Fig. 6 에 도시한 바와 같이 2 개 부품간의 경계형상으로 표현될 수 있는데, 이는 실제 부품에 있어 부품의 의도기능을 수행할 수 있도록 기계가공을 통하여 생성되는 가공 특징형상[6] 의 경계형상과도 일치한다. 이러한 기능수행 부위는 설계자가 그 형상을 직접 설계할 수도 있으며, 운동 자유도의 구속조건을 기반 (DOF Constraint-based) 으로 하여 각각의 기능들에 대한 기능수행 부위의 개념적인 형상을 사전에 정의하여 사용할 수도 있다.

설계된 각각의 기능수행 부위는 Fig. 6 에 도시한 바와 같이 설계자에 의하여 공간상에서 적합한 위치에 배치되어야 한다. 이는 부품의 개념이 상호 연관성을 가지고 있는 특징형상들의 조립체[7] 라는 것과 그 맥락을 같이 한다.

Fig. 6 (a) 에는 3 개의 플래닛 기어 축의 한쪽 단을 지지하는 베어링과, 썬기어 축을 지지하는 베어링을 고정하기 위한 "고정 기능수행 부위"가 도시되어 있다. Fig. 6 (b) 는 3 개의 플래닛 기어의 회전운동과 썬기어에 대한 공간제공 기능에 대한 기능수행 부위를 나타낸다. 여기서 3 개의 플래닛 기어에 대한 공간제공 기능수행 부위는, 추후 합성되어야 할 플래닛 기어와 링기어의 기능적관계 (회전운동의 전달) 를 미리 고려하였기 때문에, 썬기어의 회전운동을 위한 기능수행부위와는 다른 형상으로 설계되었다. 이와 동일하게 Fig. 6(c) 와 Fig. 6(d) 는 각각 3 개의 베어링에 대한 고정 기능수행 부위를 그리고 스플라인 축을 캐리어에 고정하기 위한 평면형 기능수행 부위이다.

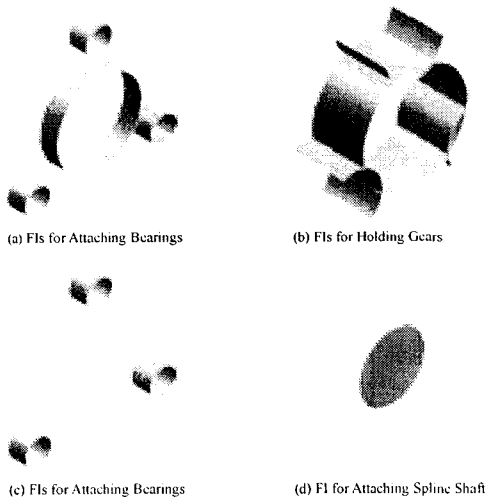

Fig. 6 Designed Functional Interfaces of Carrier

3.3 형상 합성

기능수행 부위들은, 그 각각이 경계형상을 나타내기 때문에 3D 솔리드의 형상을 가지기 위해서는 기능통합 부위를 생성하여야 한다. 이와 같은 기능통합 부위의 생성은 Fig. 7 에 도시한 바와 같이, 각각의 기능수행 부위에 대한 Closed Half Space 를 불리언 연산 (Boolean Intersection) 함으로써 생성할 수 있다. 그러나 Fig. 7 (a) ~ (c) 의 경우와 같이, 최 외각 경계 (Extremal Boundary) 로 이용할 수 있는 기능수행 부위가 없을 경우가 존재할 수 있다. 이러한 경우에는 기 설계한 기능수행 부위들의 배치를 고려하여 최 외각 형상에 대한 구속조건으로 사용할 수도 있다. 이와 더불어 회전체의 경우 최 외각 형상이 원통형이어야 한다는 설계 규칙[8] 을 미리 정의하여 적용할 수도 있다. 또한 부품의 최 외각 형상은 대개 1 차 공정 (Primary Process) 단계에서 결정[9] 되므로 추후 수행될 가공공정을 사전에 고려하여 최 외각 형상에 대한 구속조건으로 사용할 수도 있다. 여기서 전제되어야 할 것은 본 연구의 궁극적인 목표가 개념단계에서의 형상 합성을 통한 공정설계의 수행임을 고려하여 최 외각 형상 또한 개념단계 수준에서 가공이 가능할 수 있도록 간단한 형상으로 구현되어야 한다. Fig. 7 에 도시한 4 개의 기능통합 부위들은 각기 Fig. 6 에 도시한 기능 수행 부위들에 대응되는 것이다.

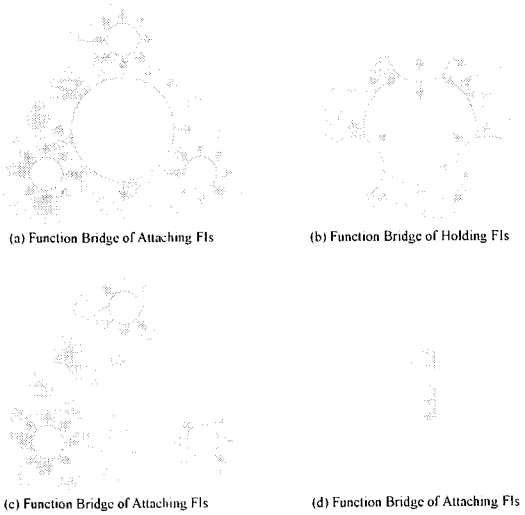

Fig. 7 Function Bridges of FIs for Synthesizing Carrier

생성된 기능통합 부위들을 이용하여 최종적으로 합성된 캐리어의 개념적인 형상과 캐리어의 기능수행 부위들을 Fig. 8 에 도시하였다. 본 연구에서는 기능수행 부위들의 배치를 고려하여 기능통합 부위의 최 외각 형상을 결정하였다.

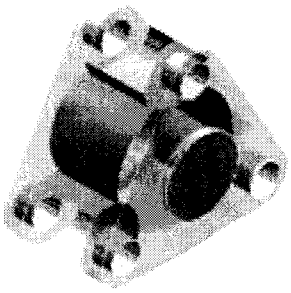

Fig. 8 Synthesized Shape of Carrier and FIs

Fig. 9 에 본 연구를 통하여 설계된 플래닛 기어 시스템의 3D 조립체를 도시하였다. 3.2 절에서 언급한 바와 같이, 기능수행 부위는 2 개 부품간의 기능적 관계를 부여하는 경계형상이기 때문에, 하나의 기능수행 부위를 설계함으로써 2 개 부품의 경계형상이 동시에 설계될 수 있다는 특징이 있다. 따라서 Fig. 9 에 표시된 베어링과 같은 개념적 형상은 캐리어와 축의 기능수행 부위를 설계함으로써 간단하게 합성될 수 있다. 캐리어의 형상합성에 직접적인 영향을 미치지 못하는 링기어는 Fig. 9 에 도시하지 않았다.

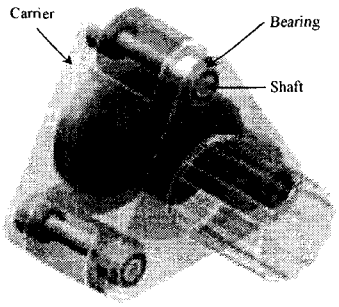

Fig. 9 Conceptual Planetary Gear Transmission System (Not Showing Ring Gear)

4. 결 론

본 연구에서는 회전운동을 전달하는 플래닛 기어 시스템을 예제로 하여, 개념단계에서의 기능설계와 부품의 공정설계 수행을 위한 부품의 형상합성 방법론을 제시하였다. 더불어 부품의 형상은 조립체 내에서 요구되는 의도기능을 수행할 수 있도록 하는 기능수행 부위와 이러한 기능수행 부위를 통합하여 하나의 부품형상을 갖도록 하는 기능통합 부위로 구분될 수 있으며, 이들을 이용하여 개념단계에서의 공정설계 수행을 위한 부품의 개념적 형상이 합성될 수 있음을 보였다.

그러나 개념단계에서, 다양한 제품의 기능설계와 다양한 부품의 형상합성이 가능하기 위해서는, 보다 체계적인 기능구분 체계가 수립되어야 하며, 또한 기능수행 부위의 설계 및 기능통합 부위의 생성을 위한 보다 폭 넓은 설계규칙의 확립이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 (R05-2001-000-01106-0) 및 과학기술부 국가지정 연구실 사업 (M1-0104-00-0054) 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. W. Nederbragt, R. Allen, S. Feng, S. Kaing, R. Sriram, and Y. Zang, "The NIST Design/Process Planning Integration Project," *Proc. of AI and Manufacturing Research Planning Workshop*, pp. 135－139, 1998.
2. C. F. Kirschman, G. M. Fadel, and C. C. Jara-Almonte, "Classifying Functions for Mechanical Design," *Proc. of ASME Conf. on Design Theory and Methodology*, 1996.
3. W. Van Holland, "*Assembly Features in Modeling and Planning*," Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, 1997.
4. J. K. Gui and M. Mäntylä, "Functional Understanding of Assembly Modelling," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 6, pp. 435－451, 1994.
5. 홍진웅, "*기계제품의 하향식 기능설계 및 설계과정 모델링을 지원하는 CAD 시스템 프레임워크의 구축*," 서울대학교 박사학위 논문, 1999.
6. 임진승, 김용세, "제품개발 초기단계의 제품설계와 공정설계의 통합을 위한 특징형상과 의도기능 및 가공 공정간의 상관 관계에 관한 연구," *한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집*, pp. 540－545, 2002.
7. J. J. Shah and M. T. Rogers, "Assembly Modeling as an Extension of Feature-based Design," *Research in Engineering Design*, Vol. 5, pp. 218－237, 1993.
8. Y. S. Kim and S. C. Feng, "Case Studies to Understand the Relations among Function, Form and Manufacturing Process for Integration of Process Planning into Early Design Stage," *Proc. of ASME Conf. on Computers and Information in Engineering*, 1999.
9. G. Boothroyd, P. Dewhurst, and W. Knight, "*Product Design for Manufacture and Assembly*," Marcel Dekker, 1994.