한국정밀공학회지 제18권 제10호 (2001년 10월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 18, No. 10, October 2001.

소규모 시스템의 요건에 의한 설계

김의중*, 신근하**, 최재성***

A Requirements Driven System Design Process for a Small System

Eui Jung Kim*, Keun Ha Shin**, Jae Sung Choi***

ABSTRACT

Systems engineering has been utilized in system development primarily for large-scale projects or commercial large-scale systems during the last several decades. We can understand why it would be useful to apply systems engineering to the development of a relatively small system. However, it is difficult to effectively carry out a project due to the complexity in applying the methods of systems engineering. To apply systems engineering to the development of a small system, the system engineering processes should be tailored.

We established a requirements driven system design process(RDSDP) that can effectively carry out the system design for a small system. RDSDP is a system design process that treats all the requirements thoroughly and effectively. This is applied by the designer according to a standardized and systematized process during the first phase in design, in which system specifications are made. By using RDSDP, we can affect a reduction of the number of redesign phases in the process of the system design, shorten the period for to make specification, which will then cause the system to succeed in the actual application.

Key Words : Systems engineering (시스템공학), Small system (소규모시스템), System design process (시스템설계과정), CNC polishing system (수치제어 폴리싱)

1. 서론

시스템공학과정은 시장에서의 경쟁력 있는 시스템을 개발하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 모든 시스템의 개발에 유익하다.[1] 그러나 시스템공학과정은 대형 국가과제나 초대형 프로젝트의 수행이 필요한 대형 상품의 개발에 적용되고 발전되어 왔기 때문에 상대적으로 규모가 작은 시스템의 개발에는 많이 적용되지 못하고 있다. 한편 모든 산업에서 시스템공학기법이 적합하며[2] 모든 산업에서의 시스템이 보다 복잡하고 고성능화 됨에 따라서 시스템공학은 좋은 개념이 된다는 주장도 있다.[3] 그리고 시스템공학은 비용 초과와 일정지연 등 비용이 발생되는 실수를 회피하기 위한 필요로부터 발전되어 왔으며 소규모시스템의 개발에 있어서도 꼭 필요하다는 주장이 있다.[4] 그밖에도 상업적인 소규모 시스템개발에 시스템공학을 적용하기 위한 연구와 노력들이 보고되고 있다.[5,6] 그러나 시스템공학기법이 활발하게 상업적인 소규모 시스템에 적용되지 못한 것은 소규모 시스템의 경우 복잡도가 상대적으로 낮고 개발에 참여하는 인원도 적

접수 2001년 1월 30일 접수
* 고등기술연구원 생산기술센터 및 아주대 시스템공학과
** 아주대 기계및산업공학부
*** 아주대 시스템공학과

어 복잡한 대규모의 시스템개발에 적용되는 과정을 그대로 사용할 수 없기 때문이며 시스템공학과정을 따르는 것은 서류작업만 늘어날 뿐이라는 생각이 지배적이기 때문이다.

기존의 시스템공학적인 개발과정 중 시스템설계과정을 테일러링하여 규모가 작은 시스템개발에 적합한 설계자 중심의 효율적인 시스템설계과정을 구축하였다. 구축된 시스템설계과정은 시스템요건 개발과 분석, 기능분석 및 할당, 시스템구조설계 및 설계공리를 이용한 설계검증과정을 포함한다. 그리고 본 설계과정을 초정밀 CNC 폴리싱 시스템설계에 시스템공학 전산도구인 RDD-100^{R}을 사용하여 적용하였다. 본 논문은 구축된 시스템설계과정과 본 과정을 실제 시스템설계에 적용한 결과 및 효과에 관한 것이다.

2. 본문

2.1 일반적인 소규모 시스템설계과정

일반적으로 소규모 시스템의 설계과정은 개발목표를 달성하기 위한 시스템구조설계에서부터 시작된다. 즉, 시스템의 최상위 요건인 개발목표의 분해와 분석과정 없이 잘 정의되지 못한 소비자의 성능과 기능요구사항으로부터 곧바로 설계안을 도출하며 이를 사용하여 상세 설계가 시작된다. 아래의 Fig. 1에 이 설계과정을 나타내었다. 그림에서 보듯이 일반적인 설계과정은 역(reverse) 설계과정과 같으나 점선으로 나타낸 모든 역 설계과정을 거치지 않는 경우가 많다.

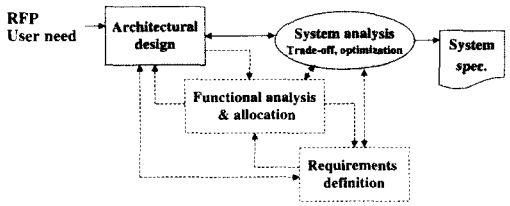

Fig. 1 General system design process for small system

그러나, 시스템설계시 가장 중요한 사용자요구사항 및 고객요구사항의 경우 일반적으로 기술적인 요건이 아니며 서로 상충되는 경우가 많다. 또한 다른 이해당사자가 많기 때문에 요건은 특정한 고객만을 고려해서는 안되며 고객이 요건을 제공할 때도 궁극적으로 시스템을 개발하기 위해 규정이 필요한 요건의 전 범위를 표현하지 않는다. 따라서 일반적 시스템설계 과정은 요건의 불 완전성을 해결하지 못하고 설계에 들어가기 때문에 설계과정 및 결과에 항상 문제가 발생한다. 또한 정확한 문제의 정의가 없었기 때문에 이를 해결하는 설계과정 중에 반복적인 설계문제발생과 이를 해결하기 위한 재 설계에 많은 노력과 시간이 필요하게 된다. 이는 전체 시스템개발주기에서 개발의 단계가 진행됨에 따라서 설계변경에 따른 비용이 기하급수적으로 증가한다는 사실에 비추어 볼 때 많은 비용적인 손실을 발생시킨다.

2.2 요건에 의한 시스템설계과정

2.2.1 요건에 의한 설계과정

요건에 의한 설계과정은 Fig. 2에 나타낸 표준적인 시스템 설계과정[9]을 따른다.

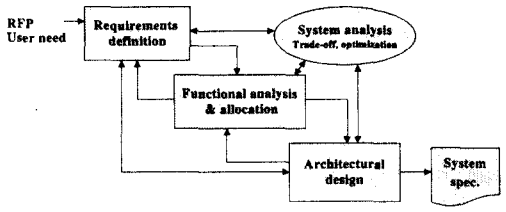

Fig. 2 Proposed system design process for small system

본 과정은 문제의 정의부터 시작되며 시스템의 기능과 시나리오 분석을 통하여 요건의 완전도를 높이는 과정을 거쳐 요건을 만족시키는 설계안을 도출하여 시스템 사양을 결정하는 과정으로 구성되어있다. 전 설계과정동안 시스템설계검증과 최적화 과정이 동시에 수행된다. 그러나 이 표준적인 시스템 설계과정의 세부 단계들은 대규모 복합시스템 설계에 적합하도록 구성되어 있어 소규모시스템의 경우에는 설계과정의 테일러링이 필요하다. 다음절들에 소규모 시스템 설계에 적합하도록 테일러링한 세부 설계과정을 나타내었다.

2.2.2 요건의 정의 및 분석 과정 (Requirements definition)

본 논문에서의 소규모 시스템의 정의를 "항상 제한되고 고정된 기능요건을 만족시켜야 하는 시스

템"[7]으로 내리면 소규모 시스템의 요건은 숫자적으로 많지 않고 기능요건이 시스템의 수명주기동안에 변하지 않는 것이 된다. 나머지 요건의 특성은 대규모 시스템에 대한 것과 본질적으로 동일하다.

소규모 시스템에 대한 요건개발 및 검증과정을 대규모 시스템개발에 대한 과정을[8] 사용하여 Fig. 3에 나타낸 9단계로 테일러링하여 구축하였다. 그림에서의 R은 Review 단계를 말한다.

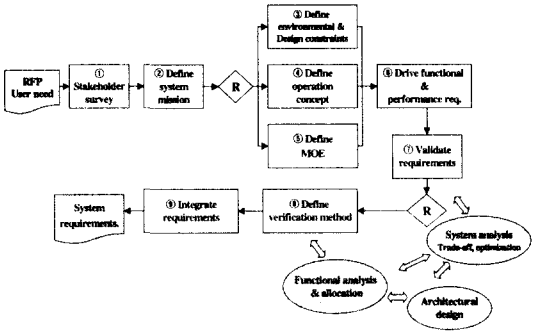

Fig. 3 Requirement development and validation process for small system

① 이해당사자 조사 및 요건수집

소규모 시스템의 경우 대부분 설계자 자신도 이해당사자가 된다. 또한 보통 이 과정을 주도적으로 설계팀에서 수행하게 되는데, 이는 기술적으로 많은 정보를 가진 설계자가 다른 이해당사자의 요구사항을 기술적인 요건으로 가장 잘 변환시킬 수 있기 때문이다.

② 시스템의 목적, 시나리오, 경계 정의

소규모 시스템의 경우 시스템의 목적은 몇 줄의 문장으로 정의될 수 있는데 이것은 개발에 참여한 사람들이 명확한 공동의 목표를 갖기 위해 필요하다. 또한 시스템의 기능적인 요건을 유도하고 완전도를 높이기 위해서는 시스템의 거동시나리오를 정의할 필요가 있고 이 거동시나리오를 사용하여 시스템의 시험에 대한 계획이 수립된다.

③ 시스템의 환경, 설계제약조건 정의

주로 비용과 개발기간에 대한 것이며 필요한 경우 각 서브시스템에 목표를 할당한다.

④ 시스템의 운전과 지원 정의

⑤ MOE(Measure of Effectiveness)정의

시스템의 성능과 관련된 가장 중요한 항목을 정의하는 것이다. 소규모 시스템의 경우 MOE는 시스템성능과 관련된 항목이 대부분이다. 또한 이것은 기술적으로 달성하기 가장 어려운 항목이 될 경우가 많으며 이를 위해 시스템개발 과정 중 별도의 기술개발과제의 수행이 필요할 때도 있다.

⑥ 기능과 성능요건의 정의/유도

이해당사자로부터 수집된 요구사항들은 피상적이고 잘 정의되지 않은 것이 많다. 따라서 이 단계에서 설계팀은 시스템개발과 관련된 여러 단계(개발, 제조, 시험, 배치, 운전, 지원, 훈련, 폐기)를 고려하여 시스템에 요구되는 성능과 기능요건을 분석하고 시스템요건으로 작성해야 한다.

⑦ 요건확인

요건확인은 이해당사자의 요구사항을 바르게 시스템요건으로 바꾸었는가를 확인하는 것이다. 유효하지 않은 요건을 제거함으로써 요건의 완전도를 높인다.

⑧ 요건검증방법 정의

모든 시스템요건은 시스템을 개발하는 동안 추적 관리되어야 하고 개발된 시스템이 요건을 만족시키는지 검증되어야 한다.

⑨ 요건 통합

요건의 통합은 시스템개발 과정에서 추적이 쉽도록 정리되어야 하고 소규모 시스템의 경우 8가지 시스템개발단계에 대하여 성능, 기능, 제약조건 등으로 분류하여 시스템사양서로서 정리하는 것이 좋다.

시스템의 수명주기비용이 이 초기 설계단계에서 대부분 정해지기 때문에 충분한 시간과 자원을 시스템의 요건을 개발하고 분석하는데 할당해야 한다.

2.2.3 기능분석 및 할당과정 (Functional analysis & allocation)

기능분석의 목적은 시스템의 기능구조를 구축하는 것이다. 이 과정 동안에 시스템의 하드웨어와 소프트웨어에 상위기능과 하위기능을 할당함으로써 시스템구조의 기반이 구축된다. 또한 시스템기능분석을 통하여 요건개발시 빠진 요건들을 유도하고 보완하여 시스템요건의 완성도를 높인다. 이 과정을 통해 시스템이 수행하게될 것을 이끌어 내며 이 과정의 완료는 문제정의가 완료된 것을 의미하여 시스템구조 설계를 할 수 있게 한다.[9]

기능분석과정은 Fig. 4에 나타낸 것 같이 우선 기능요건의 분석과 시스템시나리오 및 거동분석을

통한 상위기능의 정의로부터 시작되며 하위기능으로의 반복적인 전개와 각각의 기능간의 인터페이스를 정의하고 각각의 기능에 요건을 할당하는 것으로 완료된다. 기능분석 결과로서 거동 분석도, 데이터 흐름도, 기능블럭도, 기능구조도 등을 작성하게 되며 기능분석의 결과는 시스템운영을 위한 소프트웨어 구조설계에 많은 도움을 줄 수 있다. 따라서 기능 분석시 기능간의 인터페이스를 빠짐없이 분석해야 한다.

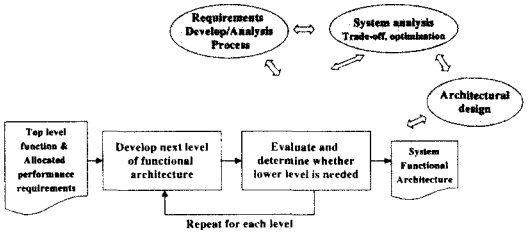

Fig. 4 Functional analysis/allocation process

마지막으로 설계된 시스템기능을 시스템구조 설계와 연계하여 시스템요소에 할당, 기능요건의 추적성을 확보하고 반복적인 설계과정을 거치면서 요건의 완성도를 높여 최적의 시스템구조설계를 완성해 나간다.

2.2.4 시스템구조 설계과정 (Architectural design)

구조설계 과정에서는 Fig. 5에 나타낸 것과 같이 시스템요소의 선택보기를 조사하고 이에 요건을 할당한다. 또한 이 과정에서 시스템요소간의 인터페이스를 정의하고 기능과 성능요건 만족도를 검사해야 한다.

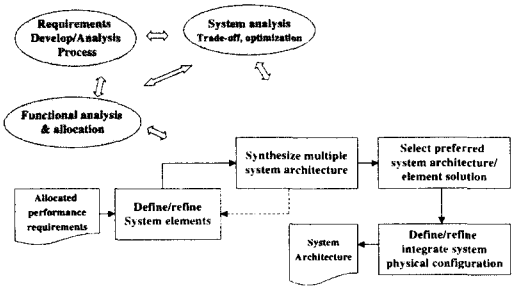

Fig. 5 System architecture design process

소규모 시스템의 경우 설계최적화를 위한 모델링을 통한 시뮬레이션이 대규모 시스템에 비하여 간단하며 시스템 구조설계는 대규모시스템에 비하여 전문공학에 대한 상세한 지식을 필요로 한다. 설계최적화를 통하여 하나의 시스템구조가 결정되면 이 과정이 완료되고 결과로서 요건의 추적관리 체계가 구축되며 시스템의 상세 설계사양이 결정된다.

2.2.5 시스템설계검증 (System analysis)

위 시스템 설계과정에 적합하고 효율적으로 설계검증의 품질을 확보할 수 있는 체계적이고 논리적인 설계검증과정을 개발하였다.

시스템설계에 대한 최적설계방법으로 두 개의 공리(axiom)를 이용한 방법이 제안되었다.[10] 이 방법은 이미 제품설계에서 효용성이 입증되고 있고, 구축된 시스템 설계과정 중에 분석된 시스템의 기능요건과 선택된 시스템요소를 그대로 사용하여 설계검증을 손쉽게 할 수 있는 이점이 있어 공리적설계과정에서 적용되는 설계공리, 코러레리(corollary)와 정리(theorem)를 사용하여 설계검증의 과정을 Fig. 6과 같이 5단계로 구축하였다. 마지막 설계검증 단계와 연결시켜 설계최적화 루프를 추가하여 설계검증과 더불어 최적의 시스템설계를 도출할 수 있도록 하였다.

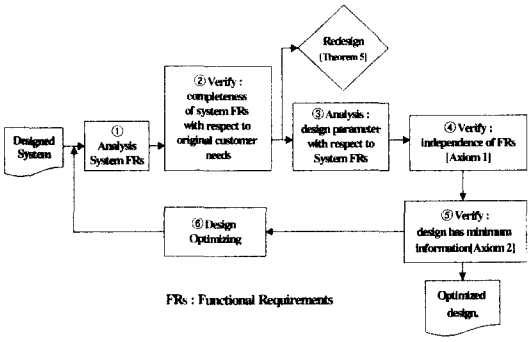

Fig. 6 Main process of design verification

공리적설계 방법을 이용한 설계검증과정은 설계된 시스템의 기능정의에서 시작되며 설계변수를 분석하여 설계행렬을 구한다. 설계행렬의 분석을 통하여 시스템설계를 검증하며 최적설계안의 도출은 설계에 포함된 정보량을 분석함으로써 가능하

다. 검증하고자 하는 설계수준에 따라서 설계행렬의 분석수준이 결정된다.

2.3 CNC 폴리싱 시스템설계

여기서 설계하고자하는 시스템을 사용하여 최종적으로 개발하고자하는 과제의 목표를 Fig. 7 에 나타내었다. 설계한 CNC 폴리싱 시스템은 기술개발목표를 달성하기 위해 필요한 시스템으로서 전체 과제에서 하나의 인에이블링(enabling) 시스템이다.[8]

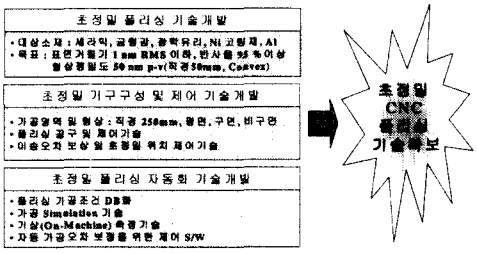

Fig. 7 Target of technology development

2.3.1 시스템의 요건개발 및 분석

구축된 요건개발 및 분석과정을 사용하여 초정밀 CNC 폴리싱 시스템의 요건분석을 시스템공학 전산도구인 RDD-100^{R}을 사용하여 수행하였다. 중요한 이해당사자인 설계자가 시스템목적, 시나리오 및 시스템경계를 정확하게 정의하기 위해 필요한 관련 기술들과 개발사례에 대한 조사결과를 Fig. 8 에 나타내었다.

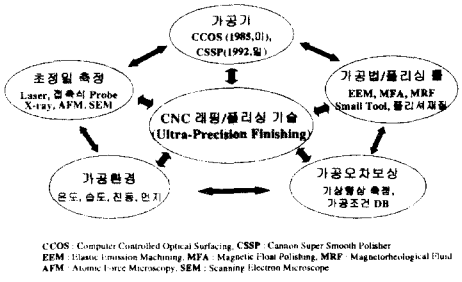

Fig. 8 Ultraprecision finishing technology

요건수집결과 요건분석과정의 입력으로써 사용자 요건, 과제요건, 시험요건 등 총 25개가 있었으나 그 형태가 최종적으로 개발될 기술에 대한 요건만 나열되어 있어 요건간에 수준이 맞지 않고 검증이 어려운 특성을 가지고 있었다. 기술개발사례와 특허분석을 통하여 시스템의 MOE를 정의하고 최초 요건으로부터 시스템 개발의 여러 단계를 고려하여 총 147개의 최하위의 시스템요건을 유도하였다. 최하위 요건을 확인 과정을 거쳐 중복되거나 상호 충돌이 있는 요건을 수정, 보완하고 3가지의 성능적인 요건과 5가지의 기능적인 요건으로 분류하여 정리하였다. 또한 상세한 검증이 필요한 요건으로 9개를 분류하였다. 분석된 최하위요건에 상세한 요건의 내용, 요건간의 관련성, 분류, 기능과 시스템요소와 할당관계 등의 속성을 부여하였다. 따라서 한 요건 변경시 상호영향도 분석과 변경사항을 관련된 전 요건에 대하여 빠짐없이 반영할 수 있다. Fig. 9에 본 과정을 통하여 구축된 요건체계도의 일부와 객체화된 하나의 요건에 대한 상세한 속성을 나타내었다.

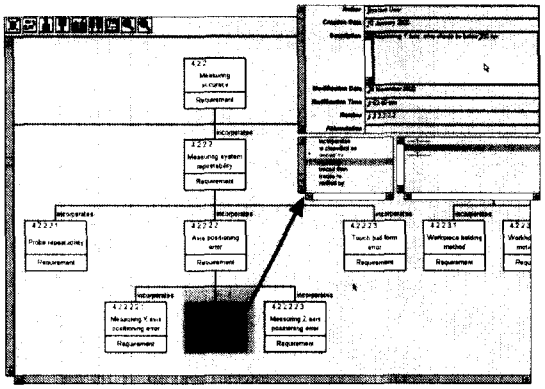

Fig. 9 Requirement hierarchy and attribute

본 요건개발과 분석과정의 적용을 통하여 시스템요건을 체계적으로 유도할 수 있어 요건분석작업의 효율을 높일 수 있었다. 또한 전산도구의 사용으로 설계데이터의 수정 및 보완이 쉬운 이점이 있었으며 도구에서 제공하는 스키마(schema)를 사용함으로써 요건분석의 틀이 자동적으로 제공되었다.

2.3.2 시스템의 기능 및 구조설계

CNC 폴리싱 시스템설계의 경우 시스템거동분석과 구조설계 동안에 요건의 수정 및 보완이 동시에 이루어졌으며 설계대상의 복잡도가 낮아 시스템거동분석과 구조설계를 동시에 수행하는 것이 효율적이었다.

먼저 초정밀 CNC 폴리싱 시스템의 요건 중 5가지로 분류된 기능적인 요건을 입력으로 요건분석/할당과정을 수행하였다. 시스템의 기능구조를 시스템거동분석을 통하여 구축하였다. 거동분석은 자동오차보상공정, 형상측정공정, 형상오차분석공정, NC 프로그램공정, 폴리싱공정에 대하여 수행하였다. Fig. 10에 분석된 폴리싱공정에 대한 최하위 기능까지 전개된 기능구조도의 일부를 나타내었다.

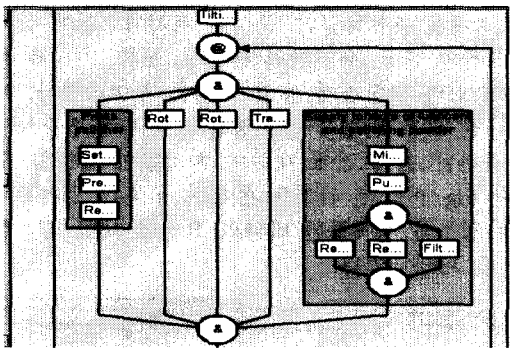

Fig. 10 Behavior diagram of polishing process

각각의 거동에 대하여 하위거동으로 분석수준을 전개하여 전체적인 시스템 기능구조도를 완성하였다. 다음으로 앞 단계에서 구한 시스템성능요건과 기능 구현을 위한 시스템요소의 체계구조를 설계하였다. 본 과정의 입력으로서 시스템의 성능적인 요건과 기능을 사용하였으며 2가지의 체계구조를 설계하였다. 설계된 체계구조로부터 다음절의 설계검증단계를 거쳐 하나의 설계안을 선정하였다.

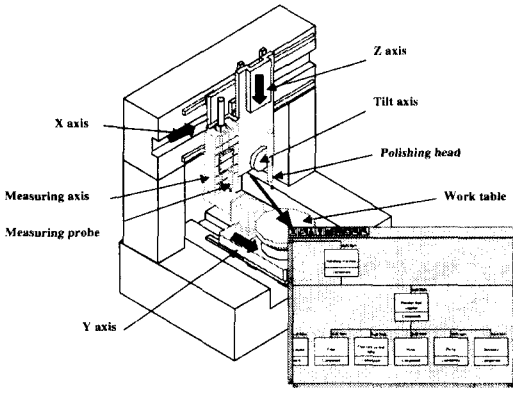

Fig. 11 Component hierarchy and schematic of polishing machine

구축된 시스템요소체계구조의 최상위는 CNC 폴리싱이며 이것은 폴리싱기계, 기상측정시스템, 공압공급시스템, 온도제어장치로 구성된다. Fig.11에 설계된 하드웨어의 구조도 일부와 이를 알아보기 쉽게 도면화한 것을 나타내었다. 이 중에서 하위 요소로 전개가 필요한 폴리싱기계, 기상형상측정시스템에 대하여 하드웨어와 소프트웨어로 구성된 최종 78개의 하위 요소가 설계되었다. 시스템구조 설계는 시스템설계 과정의 전개에 수준을 맞추어 상위요소로부터 하위요소로의 전개가 이루어졌으며 시스템의 최하위요소에 시스템요건과 기능을 할당하여 시스템요소의 선정에 대하여 요건만족도를 검증하고 요건의 추적성을 확보하였다.

설계과정의 최종 결과물로 얻어지는 시스템사양서는 Fig. 12에 나타낸 것과 같이 각 단계의 객체화된 설계결과가 하나의 데이터베이스로 통합된 설계데이터 구조를 갖는다. 각각의 객체화된 데이터 간에는 그림에서 나타낸 것과 같이 데이터의 속성에 요건과의 관계를 부여함으로써 요건이 할당되며 자동적으로 요건의 추적성이 확보되어 설계 변경사항 발생시 관련요소에 빠짐없이 반영할 수 있는 장점이 있다.

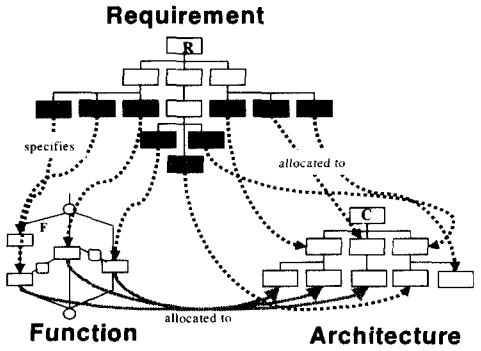

Fig. 12 Structure of system design data

2.3.3 시스템설계 검증

시스템의 상위 기능요건과 상위 시스템요소에 대한 설계검증을 설계공리를 이용한 설계검증 방법을 사용하여 실시하였다. 요건분석결과 형상수정 폴리싱 기능이 시스템개발에 있어서 가장 중요한 기능요건으로 나타났기 때문에 이 기능에 대하여 설계검증을 수행하였다. 먼저 1차 하위기능요건 3가지에 대한 설계검증 수행결과 기능요건과 시스템

요소사이의 설계행렬이 독립성을 만족시켰으며 공구의 궤적 생성에 대한 2차 하위기능요건 4가지에 대한 설계검증을 수행한 결과 Fig. 13에 나타낸 기계의 각 축 구성에 대한 2가지의 설계안 모두 설계행렬이 독립성을 만족시켰으나 그 중 설계에 포함된 정보를 분석한 결과 더 적은 정보를 가진 공작물 틸팅방식으로 설계안을 결정하였다.

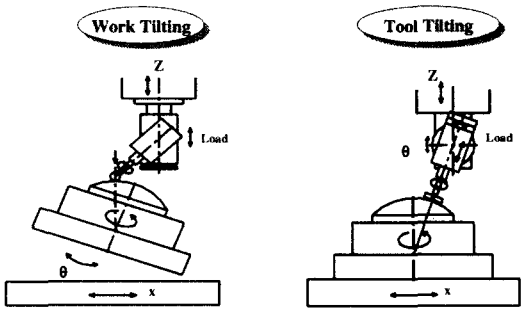

Fig. 13 Design alternatives of polishing machine

그러나 시스템의 모든 하위 기능에 대한 설계검증은 소규모 시스템이라 하더라도 수 십개의 요건이 되어 설계행렬을 구하고 다루기에는 수 작업으로는 어려움이 있었다. 또한 실제 하위수준 기능의 경우 전문공학적인 설계검증을 필요로 하기 때문에 요건분석과정에서 검증이 필요한 중요항목으로 분류된 9개의 최하위요건에 대한 상세한 설계검증은 전문공학적인 검증과정을 통하여 수행하였다. 이과정의 수행을 통하여 최종적인 시스템사양이 확정되었다.

3. 결론

시스템공학과정의 장점을 소규모의 시스템개발에 활용하기 위하여 소규모 시스템설계에 적합한 설계과정을 구축하였다. 구축된 설계과정은 시스템 요건을 개발하고 확인하는 과정, 기능 분석 및 할당, 시스템구조 설계와 시스템설계 검증 및 최적화 과정을 포함한다. 개발된 설계과정을 CNC 폴리싱 시스템설계에 적용하고 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 소규모의 시스템설계에 시스템공학과정을 테일러링하여 적용함으로써 경쟁력 있는 설계안을 도출하기 위한 체계적인 설계과정이 정립되었다.

2) 본 설계과정의 적용시 개발하고자 하는 시스템의 모든 국면에서의 요건을 빠짐없이 구할 수 있으며 본 과정의 적용을 통하여 일반적인 설계과정을 거치는 것에 비해 설계과정에서 재 설계가 줄어드는 효과가 있었다.

3) 상용 시스템공학 전산도구를 설계과정에 사용함으로써 설계데이터의 수정 및 보완이 쉬운 이점이 있었다.

후기

본 논문은 선도기술 개발사업 중 첨단생산시스템개발의 연구비에 의하여 지원되어졌으며, 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. Kurt Skytte, "Engineering a Small System," IEEE SPECTRUM, pp. 563-565, March, 1994.
2. Tim Cathcart, Jeffrey O. Grady, Ravi Jain, Dan Surber, "Commercial System Development Models," INCOSE Symposium, 2000.
3. V.A. Lentz, "Five Realities for Systems Engineering in Commercial Enterprises," INCOSE Symposium, 2000.
4. Crystal D. Sloan, Jr., William H. McCumber, Jr., "Systems Engineering in the Small," INCOSE Symposium, 1998.
5. Edward V. LaBudde, "Barriers to Bringing System Engineering into the Commercial Market Place," INCOSE Symposium, 1997.
6. Carol J. Gutierrez, Jane McKennon, Miriam Eldridge, Abhijeet Bhadar, "Developing a System Solution in a Commercial Environment," INCOSE Symposium, 1997.
7. Nam P. Suh, "Design of Systems," Annals of the CIRP Vol. 46, No.1, 1997.
8. James N. Martin, "Systems Engineering Guidebook," CRC Press, 1996.
9. INCOSE, "System Engineering Handbook," INCOSE, 1998.
10. Nam P. Suh, "The Principles of Design," Oxford, 1995.