

공리적 설계 기법을 이용한 생산시스템 설계 지원 방안에 대한 고찰

백태진*(성균관대 대학원 기계공학과), 강무진(성균관대 기계공학과)

Application of Axiomatic Design Theory in Manufacturing System Design

T. Back (Graduate School, SKKU), M. Kang (Mechanical Eng. Dept., SKKU)

ABSTRACT

To cope with the challenge from global market characterized by frequent changes in requirements, manufacturing enterprise should be able to promptly adjust its manufacturing system accordingly. Therefore, it is important to provide manufacturing system designer with an appropriate methodology to (re-)design a manufacturing system subject to requirements change. Axiomatic design theory focuses design activity mainly on functional consideration rather than physical, and has been known as effective especially in the conceptual design phase. This paper introduces an approach to apply the axiomatic design principle to manufacturing system design. It is shown that a new design solution can be reached quickly by finding design parameters for the added or revised functional requirements and thus achieving a set of functional requirements as well as design parameters that satisfy the independence axiom. Some illustrative examples are also given.

Key Words : Design Axiom(설계 공리), Functional Requirement(기능 요구), Design Parameter(설계 변수), Design Matrix(설계 행렬)

1. 서론

오늘날의 생산시스템은 소비자의 다양한 요구, 생산 기술의 발전 등에 의해서 신속하게 생산시스템의 재구성할 수 있는 능력을 요구하고 있다. 예측 불가능하고 동적인 시장 환경에 맞는 생산시스템을 구축하는 것이 곧 기업의 경쟁력을 키우고 유지시킬 수 있는 중요한 요인이 되기 때문이다.¹

이러한 시스템의 구축을 위해서는 시스템 구성 요소의 기능적인 전개를 통해 대응력이 강하고 유연하고 믿을 수 있는 시스템 설계의 기반을 마련하는 것이 중요하다. 하지만 생산시스템의 구축은 많은 비용과 설계에서의 시행착오를 거치는 등 시간적 제약으로 인해 쉽사리 시스템 변경을 하지 못하는 한계점을 안고 있다. 기존의 생산시스템에 대한 경험적 지식을 이용하여 변동되는 기능 요구사항에 맞는 유사한 설계를 신속하게 할 수 있다면 한가지 해결 방법이 될 수 있을 것이다. 기존의 생산시스템 설계방법론은 시스템의 기능적인 측면이나 프로

세스 각종 데이터에 대한 흐름은 논리적으로 표현할 수 있지만 설계변경 요구에 따라 신속한 유사설계의 구축에 대한 접근방법을 제시하지는 못한다.

본 연구에서는, 공리적 설계를 이용하여 일련의 설계 사례에 대한 경험을 통해 유사한 설계를 신속히 수행할 수 있는 방안을 제안하고 조립 시스템에서의 적용 사례를 보이고자 한다

2. 공리적 설계법

설계는 성취하고자 하는 것과 그것을 어떻게 성취할 것인가라는 물음에 대한 연속적인 상호작용이라 할 수 있다. 성취하고자 하는 것은 특별한 요구에 대한 기능 요구(FR: Functional Requirement)로서 표현될 수 있고 이를 기능 요구를 만족하기 위한 물리적인 해는 설계 변수(DP: Design Parameter)로 표현할 수 있다. 즉 설계는 기능적 영역(Functional Domain)의 기능 요구들(FRs)과 물리적 영역의 설계 변수들(DPs)간의 사상(Mapping)에 의해 인지도된 요구

를 만족시키는 제품, 과정 및 시스템의 형태로 종합된 해를 창조하는 것이라고 정의 할 수 있다.

공리적 설계 방법은 다음과 같은 두 개의 설계 공리(Design Axiom)를 기반으로 한다.²

제 1 공리 : 독립의 공리(The Independence Axiom)
기능 요구 집합(FRs)의 독립성을 항상 유지한다.

제 2 공리 : 정보의 공리(The Information Axiom)
설계의 정보량을 최소화 한다.

독립의 공리는 기능적 영역의 FRs로부터 물리적 영역의 DPs로 매핑하는 과정에서 특정한 DP가 다른 FR에 영향을 미치지 않고 상응하는 FR만을 만족시킨다는 것을 의미한다. 설계의 정보량은 설계의 생산물과 생산 과정에 따른 기능 요구와 설계 변수를 성공적으로 얻을 확률로 정의 될 수 있다. 실제 설계 과정에서 두 공리를 만족하는 설계해를 찾기는 매우 어렵다. 대다수의 설계해는 연성된 설계행렬(Coupled Design Matrix)의 형태를 갖고 있기 때문에 독립의 공리를 만족하는 비연성화 설계행렬(Decoupled Design Matrix)로 변환을 시킨 후, 정보의 공리를 적용하여 최선의 설계해를 구해낸다.

공리적 설계를 생산시스템 설계에 이용한 예로 MSDD(Manufacturing System Design Decomposition)가 있다.³ MSDD에서는, 설계 목표(FR)와 그 성취 수단(DP)를 분리하고, 상위레벨 목표와 요구조건으로부터 하위레벨의 활동으로 전개하여 그들간의 관계를 규명한다. 또한 MSDD는 생산시스템 설계자가 시스템 설계의 여러 요소들 간의 상호관계를 이해할 수 있도록 도와준다.

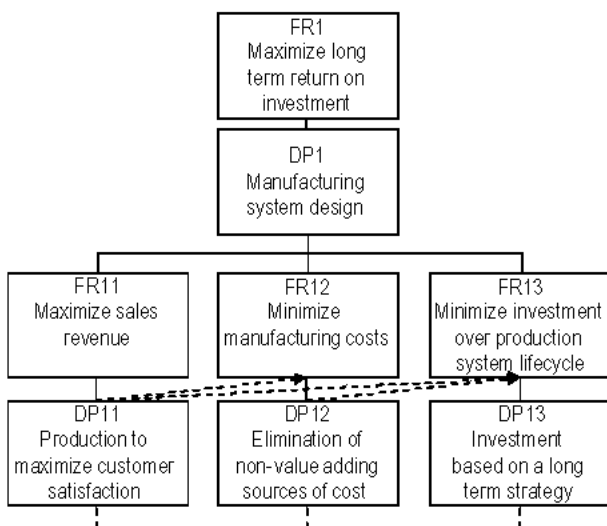


Fig.1 MSDD's upper-level decomposition

Fig.1은 MSDD의 최상위 레벨 전개를 보여준다. 그림에서 보듯이 제조 시스템의 최상위 레벨 기능 요구를 장기적 투자 수익율의 극대화로 정의하고, 그 수단을 '생산시스템 설계'로 보며, 이들은 다시 세부 기능 요구와 설계변수로 전개된다. 그림에서의 화살표는 각 설계변수가 기능 요구에 영향을 미치는 관계를 표시한다.

그러나 MSDD는 생산시스템에 대하여 기능 요구와 설계변수의 매핑 및 전개방법 까지만 보여주는 한계를 가지고 있다. 즉, 요구조건(Customer Attributes) 변화에 의해 추가되거나 변경되는 기능적 요구사항(FRs)에 대해서는 처음부터 새로이 전개과정을 되풀이 해야하는 문제점이 있다.

설계 공리를 이용한 설계는 독립의 공리에 따라서 각각의 기능 요구들이 기능적으로 독립 되어 있다는 것을 전제로 한다. 기능 요구가 바뀌는 경우에, 기존의 설계해를 이용하여 설계공리를 만족시키는 새로운 DPs를 신속하게 찾을 수 있다면, 설계 과정을 처음부터 새로이 거치지 않고 변동되는 부분만을 수정하여 새로운 설계해에 신속히 도달할 수 있다.

3. 공리적 설계법에 의한 변경설계

기존의 설계경험에 기반하여 기능 요구의 변화에 따라 변경된 설계해를 얻는 과정에 대해 고찰해보자. 우선 기존 설계행렬이 FR1, FR2, FR3과 이에 대응하는 설계변수들의 집합으로 비연성화 설계행렬식을 가진다고 가정하자.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ X & X & 0 \\ X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

고객의 요구조건이 바뀌어 여기에 새로운 기능 요구 FR4가 추가 된다면, 바뀐 FRs에 대한 새로운 설계해를 구해야 한다. FR4를 만족하는 DP를 DP4라 할 때

- ① 새로운 설계변수 DP4가 기존의 기능 요구 집합에 영향을 주지 않을 경우와
- ② 새로운 설계변수 DP4가 기존의 기능 요구 집합에 영향을 주는 경우

를 생각 할 수 있다. ①의 경우에서의 설계행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & X & X & 0 \\ a & b & c & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{pmatrix}$$

설계변수 DP4가 기존의 기능 요구 집합에 영향을 주지 않으므로 새로 구축되는 설계행렬에서는 FR4와 기존의 설계변수 집합(DP1, DP2, DP3)과의 관계 유무에 상관없이 비연성화 설계행렬이 생성된다. 행렬의 요소 a, b, c는 'X'나 '0' 값 중 어떠한 값을 가지더라도 비연성화 설계행렬이 유지됨을 알 수 있다. 이것은 추가된 FR4를 포함하는 FRs에 대해 훌륭한 설계해(DPs)를 구했다는 것을 의미하며, 이어서 추가된 FR4에 대한 기능 전개를 계속하여 새로운 최종 설계해를 얻을 수 있다.

②의 경우에서는 기존 FRs와 DP4 간에 관계가 생기므로, 설계행렬의 마지막 열에 Non-zero 요소가 나타나고, DP4가 FR2에 영향을 준다고 하면 설계행렬은 다음과 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & X \\ X & X & X & 0 \\ a & b & c & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{pmatrix}$$

이것은 연성설계에 해당되지만, 만약 b=c=0인 관계가 성립되면 변수 순서의 재조합에 따라 아래에서처럼 비연성화 설계로 변환할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_4 \\ FR_2 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ a & X & b & c \\ X & X & X & 0 \\ X & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_4 \\ DP_2 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

하지만 b나 c들 중 하나라도 'X'의 값을 가지면 그 설계행렬은 연성이 된다. 이때 새로운 설계안이 생성되기 위해서는 DP4에 영향을 받는 기존 기능 요구에 대해서 변경이 이루어지거나 전체 FRs와 DPs 간의 관계를 재정의 하여 비연성화 설계를 만들어야 한다.

다음에는 기존 FRs의 일부가 새로운 FR로 대체되는 경우에 대해 고찰해 보자. 기존의 기능 요구 FR2가 FR4로 대체되었다고 가정할 때 기존의 FRs와 FR4에 대한 설계변수(DP4)가 관계가 없다고 한다면, 설계행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_4 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 \\ d & X & 0 \\ X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_4 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

이 경우에는 d의 값에 관계없이 비연성화 설계를 얻게 된다. 만약에 새로운 DP4가 기존의 FR1에 영향을 미친다면 아래와 같이 연성화 설계가 되고, 여기서 d의 값에 따라서 설계행렬이 연성이나 비연성화 형태를 가질 수 있게 된다.

$$\begin{pmatrix} FR_4 \\ FR_1 \\ FR_3 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & d & 0 \\ X & X & 0 \\ X & e & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_4 \\ DP_1 \\ DP_3 \end{pmatrix}$$

즉 d=0이면 e에 관계없이 비연성화 설계가 되지만, d=x가 될 경우 설계행렬은 연성 형태가 된다. 이 경우 FR4에 영향을 주지 않은 DP1을 변경하거나 전체 FRs와 DPs의 재정의에 따라 새로이 설계안을 구성해야 한다.

4. 설계 사례를 통한 고찰

4.1 냉장고 설계 사례

냉장고는 냉동이나 냉장의 방법을 통해 일정기간 동안 음식을 보관할 수 있도록 만들어진 장치이다. 냉장고의 기본적인 기능 요구는 예를 들면 다음과 같이 구성할 수 있다.

- FR1: 음식을 장기간 보관
- FR2: 음식을 단기간 보관
- FR3: 저장된 내용물에 접근
- FR4: 내부 에너지 손실 최소화
- FR5: 냉장고 내 균일한 온도 유지

이에 대한 설계공리를 만족시키는 설계변수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

- DP1: 냉동실
- DP2: 냉장실
- DP3: 수직문
- DP4: 단열 재료의 사용
- DP5: 입체 냉각

이 FRs와 DPs의 관계를 설계식으로 표현하면 아래와 같다. 이것은 설계행렬이 삼각행렬의 형태를 가지므로 비연성화 설계임을 알 수 있다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{pmatrix}$$

여기서, 고객의 요구조건이 바뀌어 기존의 FRs 에 ‘소비전력 최소화’라는 추가적인 FR 이 생기는 경우를 생각해 보자. 이를 만족시키는 설계변수로서 ‘리니어 압축기’를 선택한다면, 이 새로운 DP 가 기존의 FRs 에 영향을 주지 않으므로 설계식은 아래와 같이 된다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X & 0 \\ 0 & 0 & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \end{pmatrix}$$

반면에, FR6 는 기존 설계변수 DP3~DP5 에 영향을 받지만, 여전히 비연성화 설계가 유지되므로 좋은 설계해를 얻었다고 할 수 있다. 즉, 추가된 FR 에 대한 새 DP 가 기존 FRs 에 영향을 주지 않도록 DP 를 정의 할 수 있으면, 기존 DP 와 새 DP 의 set 으로 새로운 설계를 신속하게 얻을 수 있는 것이다.

만약, FR6 를 만족하는 설계변수로 ‘인버터 기술 적용’이라는 DP6’을 선택 하였다면, 인버터 기술 적용은 냉각고 내 균일한 온도 유지 기능 향상에 기여 하므로 FR5 에 영향을 준다는 것을 알 수 있다. 따라서, 설계식은 아래와 같이 되고, 이 설계안은 독립의 공리에 위배되는 기능적으로 연성된 설계가 된다. 이 경우 좋은 설계가 되기 위해서는 전체 기능 요구에 대하여 설계공리를 만족시키는 새로운 설계변수 집합을 구하여야 한다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & X & X \\ 0 & 0 & X & X & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6' \end{pmatrix}$$

4.2 DVD Driver 설계 사례

DVD 는 일반 CD 보다 더 많은 정보를 담을 수 있고 고수준, 고품질의 영상과 음향을 제공해 줄 수 있는 매체이다. 이러한 고성능의 DVD 를 사용하기 위해서는 방대한 데이터를 인식할 수 있는 기

능을 가진 DVD Driver 가 필요하다. 이 제품 요구 사항에 대한 기능요구는 예를 들면 다음과 같이 정의 할 수 있다.⁵

- FR1: 디스크의 고속 회전
- FR2: 디스크의 고정
- FR3: 정밀한 Pick up 이송
- FR4: 트레이 이송
- FR5: CD 와의 호환

설계의 공리에 따라 위 기능 요구를 만족시키는 설계변수의 집합을 구하면 다음과 같다.

- DP1: 디스크 모터
- DP2: Clamping force
- DP3: 트래킹 모터와 가이드
- DP4: 트레이 개폐 모터
- DP5: 환형 차폐 방식

이들 DPs 와 FRs 의 상관 관계를 고려하면 다음과 같은 설계식을 얻을 수 있고, 이것은 비연성화 설계로서 좋은 설계해를 보여준다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{pmatrix}$$

DVD 는 일반 CD 의 Track 보다 촘촘한 Data Hole 사이를 광 픽업의 레이저로 Data 를 읽고 인식 하는 원리로 구성되어있기 때문에 작은 충격에도 쉽게 레이저의 초점과 각도가 틀려져 오동작을 일으키는 경우가 있다. 따라서, 작은 충격에도 정상적인 동작을 유지해야 할 필요성으로 ‘외부 충격흡수’라는 기능요구가 추가될 수 있다. 이를 만족시키는 설계변수로 ‘고강성 합성수지 사용’을 선정한다면, 외부 충격에 강한 재질을 사용하여 외부 케이스의 강성을 높일 수 있는 DP6 는 기존의 FRs 에 영향을 주지 않기 때문에 아래와 같이 비연성화설계를 구성할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \\ FR_6 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & X & 0 & 0 \\ 0 & 0 & X & 0 & X & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \\ DP_6 \end{pmatrix}$$

4.3 조립 시스템 설계에서의 적용 사례

생산시스템 설계에의 공리적 설계방법 적용을 고찰 하기 위하여, 자동차 차체 용접라인을 생각해 보자. 혼류 생산을 위한 차체 조립 시스템은 자동차 모델의 변화와 Product mix 의 생산량 변동에 따라 요구조건이 수시로 바뀔 수 있다. 차체 조립 시스템이 만족 해야 할 기능 요구는 예를 들면 다음과 같이 정의 할 수 있다.

- FR1: 차체 용접
- FR2: 목표 품질 수준
- FR3: 목표 생산량
- FR4: 특정 제품 믹스 생산

각각의 기능 요구에 대해 설계공리를 만족시키는 설계변수를 구해보면 아래와 같다.

- DP1: 용접 설비
- DP2: 품질 관리(TQM)
- DP3: 적정 생산 능력(Production Capacity)
- DP4: 생산 설비의 유연성(Flexibility)

이 기능 요구와 설계 변수의 관계를 고려하여 설계식을 구성하면 다음과 같이 비연성화 설계가 된다.

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 \\ X & 0 & X & 0 \\ X & 0 & 0 & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \end{pmatrix}$$

생산시스템에 대한 요구조건의 변경이 빈번하여 수시로 재구성되어야 한다면, 시스템 재구성에 따른 준비 시간을 최소화 해야 하는 기능 요구가 추가 될 수 있을 것이다.

- FR5: 초기 가동 시간(Ramp-up time)의 최소화

이 기능 요구를 만족시키는 설계변수로서 잘못된 스테이션과 변형의 근본적인 원인을 체계적으로 추적하여 시스템 가동 준비시간을 최소화 할 수 있는 'SoV(Stream of variation) 이론적용'을 선정하면 아래와 같은 설계식을 얻는다.⁶

$$\begin{pmatrix} FR_1 \\ FR_2 \\ FR_3 \\ FR_4 \\ FR_5 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} X & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X & X & 0 & 0 & X \\ X & 0 & X & 0 & 0 \\ X & 0 & 0 & X & 0 \\ X & X & 0 & X & X \end{bmatrix} \begin{pmatrix} DP_1 \\ DP_2 \\ DP_3 \\ DP_4 \\ DP_5 \end{pmatrix}$$

새 설계변수 DP5 는 FR2 에 영향을 미치고, DP3 을 제외한 설계변수 집합 전체가 FR5 에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이것은 연성 설계로서 초기 가동 시간의 최소화는 생산시스템의 재구성 후 시스템의 throughput 과 품질이 안정적인 레벨에 이를 때까지 소요되는 시간으로 정의되기 때문에 기존의 FR2 와는 기능적으로 독립성을 유지 할 수 없음을 나타낸다. 이 경우 좋은 설계가 되기 위해서는 전체 기능요구에 대해 설계공리를 만족시키는 설계변수의 집합을 새로이 정의해야 한다.

4. 고찰

변동하는 고객요구에 대응할 수 있는 생산시스템 설계는 기업의 경쟁력을 높이는 중요한 요인이 되므로, 생산시스템을 신속히 설계할 수 있는 기술을 확보하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 공리적 설계를 이용하여 신속하게 생산시스템을 설계하는 방안에 대하여 고찰하였다. 시스템의 기능 요구가 바뀌는 경우, 변경된 기능 요구에 대한 설계변수를 독립 공리를 만족하도록 선정함으로써 새로운 설계해를 얻을 수 있음을 보였다. 독립 공리를 만족하는 설계변수를 찾기 어려운 경우에는, 기존 설계변수를 포함한 새로운 설계변수 집합을 검토하거나, 기능요구 집합의 근원적인 재고려가 필요하다.

참고문헌

1. 김동주, "조립시스템 configurator 에 관한 연구", 성균관대학교 대학원 석사학위 논문, 2002
2. Nam. P. Suh, "The Principle Design," Oxford University Press, 1990.
3. D. S. Cochran, J. Arinez, J. Duda, J. Linck, "A Decomposition Approach for Manufacturing System Design," Journal of Manufacturing Systems, 2001
4. Nam. P. Suh, "Axiomatic Design: Advances and Applications," Oxford University Press, 2001.
5. 차성운, 문용락, "현재 개발된 DVD 의 공리적 접근에 의한 설계 평가," 대한 기계학회, 춘계학술대회논문집, pp660-666,1998
6. 박면용, "재구성형 생산 시스템," 한국 정밀공학 회지, 제 17 권, 제 2 호, pp28-29, 2000