

## 생산시스템의 설계 방법론에 관한 고찰

강무진\*, 이기성(성균관대 기계공학부), 문홍일, 김동주(성균관대 대학원),  
장인성(현대자동차), 김기태(화천기공)

### A study on the manufacturing systems design methodology

M. Kang\*, K. S. Lee(Mechanical Eng. Dept. SKKU), H. I. Moon, D. J. Kim(Graduate School, SKKU),  
I. S. Jang(HMC), and K. T. Kim(Hwacheon Machinery Co.)

#### ABSTRACT

This paper addresses the methodologies for manufacturing systems design. While a number of design methods are used in product or part design, methods for manufacturing systems design are rarely known. Two approaches, simulation and axiomatic design theory, are discussed with respective case examples. The usual purpose of using simulation is to identify the bottleneck of a manufacturing system or to evaluate its performance with the aim of configuring the manufacturing system. The simulation typically proceeds in steps such as problem definition, model building, numerical experimentation, analysis and evaluation. The axiomatic design method transforms customer attributes into functional requirements and repeats mapping processes between functional domain and physical one until a satisfactory level of refinement of the functional requirements and the design parameters is reached. Possible design alternatives are evaluated by applying the independence axiom as well as the information axiom.

**Key Words** : Manufacturing System(생산시스템), Design Methodology(설계방법론), Axiomatic Design(공리적 설계), Simulation(시뮬레이션)

#### 1. 서론

생산시스템을 포괄적으로 보면 기업의 생산활동을 수행하도록 구성된 인력, 설비, 정보의 집합이지만, 세부적으로는 다양한 제품을 경제적, 능률적으로 생산하기 위해 제품의 계획, 설계, 제조, 제어, 관리, 등에 관계되는 생산요소(인력, 설비, 정보)와 제약환경의 영향과 상호작용에 대해 충분히 고려하면서 관계되는 모든 구성요소의 통합적 조정과 최적화를 도모하는 시스템을 말한다. 이러한 모든 요소들이 생산시스템에서 유기적으로 구성되므로 그 설계는 대단히 복잡하다. 과거에는 생산시스템의 설계가 과학적인 처리방법의 외부영역으로 인식되어 생산시스템의 설계나 기존 시스템의 변경 및 개선작업은 설계자의 경험적 지식에 근거한 ad hoc 방식으로 이루어져 왔다. 그러나 이러한 방식은 체계화된 지식으로 정립하기에 한계가 있기에 과학적이

고 체계적인 방법론이 필요하다.

더욱이, 생산시스템은 시장변화에 대처하기 위해서 mass production 에서 lean production 으로 변화해 왔으나, 현재이후의 고객요구와 시장환경은 더욱 변화가 일정하지 않으며 예측 또한 어려워지고 있다. 이런 상황에 대응하기 위해서 전주기 지향적이고(life-cycle-oriented) 민첩성있는(agile) 생산시스템이 대두되고 있다. 여기서, 전주기(life cycle)란 하나의 기술이나 제품이 만들어져 사라질 때까지를 말한다. 즉, 생산시스템의 전주기란 생산시스템의 설계 단계에서부터 그 수명을 다하여 폐기하기까지의 전체 과정을 나타낸다. 그리고 민첩성은 주위의 환경이 유동적이고 가변적이며 예측 불가능한 상황에 대한 적응성이라 할 수 있다.[1] 이러한 새로운 전주기 지향의 민첩대응 생산시스템의 설계시 여러 상황에 대응하며 체계적인 접근을 도울 수 있고, 기존의 생산시스템을 재사용, 재구성, 적응시켜서

중· 단기간보다는 장기간을 운영하여 이익이 발생하도록 할 수 있는 생산시스템의 설계 방법론이 필요하다.

본고에서는 시뮬레이션(Simulation)과 공리적 설계(Axiomatic design)를 이용한 생산시스템 설계 방법론을 소개하고 그 사례를 조사하여, 더 나은 방향의 설계 방법론에 대해 고찰해 보고자 한다.

## 2. 생산시스템 설계를 위한 접근방법

### 2.1 시뮬레이션

시뮬레이션은 복잡한 공정 또는 시스템의 설계 및 운영의 결과를 효율적으로 분석하는 도구 중의 하나이다. 일반적으로 시뮬레이션이란 실제 시스템의 모델을 설계하고 시스템의 거동과 운영에 대해 실행가능한 여러 방법을 이해하기 위하여 모델을 실험하는 일체의 과정이라고 정의할 수 있다. [2]

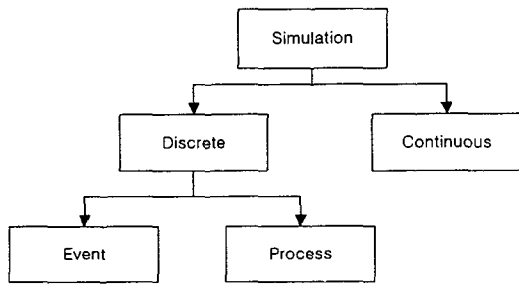


Fig. 1 Classification of simulation methods

시뮬레이션에서는 정확한 복제로 표현하기도 하거나 대상물의 두드러진 특징을 이용하여 추상적으로 만들어질 수 있다. 그러므로 아이콘 또는 기호 모델로 분류할 수 있다. 이외에도 시뮬레이션의 분류에는 여러가지가 있는데 여기에서 다루고자 하는 생산시스템 시뮬레이션의 형태는 확률적, 동적인 모델이다. 또한 시간상으로 떨어진 지점에서 시스템 상태가 변화된 것으로 설명한다면, 이산형(discrete)이라 부르는데 생산시스템은 이산적 사건(discrete event)의 발생시에 시스템의 상태가 변화하므로 이산형이라 할 수 있다. 즉 시뮬레이션에서는 생산시스템을 확률적, 동적, 이산형적인 모델로 분류하며 아이콘 또는 기호 모델로서 표현한다.

생산시스템에서 시뮬레이션은 시스템 요소의 움직임과 상호작용의 계산에 의해서 복잡한 거동을 예측한다. 기계와 작업장을 흘러가는 부품의 흐름을 분석하고 제한된 자원에 대한 요구 분석과 물리적 레이아웃, 장비 선택, 그리고 운영 방법들을 평가할 수 있다. 시뮬레이션은 실제 시스템이 아닌 모델에서 실험할 수 있게 해주고, 구입이나 실제

시스템 설치 전에 예상되는 변화 또는 새로운 설계안을 실험할 수 있게 한다. 생산 시뮬레이션의 주요한 대상은 물류 시스템, 조립라인, 자동 생산 설비, 자동 창고 설비, 재고관리, 신뢰성과 보전, 플랜트 레이아웃, 머신 디자인 등이다.

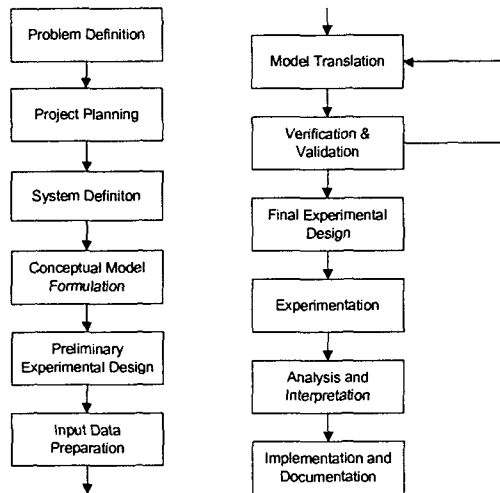


Fig. 2 Steps in simulation

시뮬레이션 모델링의 중요성 또는 목적은 궁극적으로 의사 결정자가 문제를 해결하는 것을 돕는 것이다. 그러므로 좋은 시뮬레이션 모델에 필요한 것은 사용자가 소프트웨어 공학 및 문제 해결 기술들을 적절하게 결합하는 것이다. Fig.2의 단계들은 시뮬레이션 연구에 필요한 것들이다. 그리고 7 번째의 모델 변환 단계에 앞서 문제를 이해하고 모델을 설계하고 설계하기 위해 많은 시건을 1 단계에서 6 단계까지에 많은 노력과 시간을 들여야 한다.

이러한 시뮬레이션을 돕는 툴에는 여러가지가 있다. 시뮬레이션의 언어의 형태인 SIMAN 이 있으며 그래픽 시뮬레이션 모델링 툴로서 ARENA 와 SIMFACTORY 가 대표적이다.

### 2.2 공리적 설계

설계에서의 공리적 접근방법은 좋은 설계를 판단하는데 절대적인 기준을 제시하여 주는 것을 의미한다. 공리적 설계는 설계에 대한 지식을 체계화, 논리화하여 정리할 수 있으므로 전임자의 지식을 후임자에게 용이하게 전달할 수 있다. 또한 공리를 응용한 추론이나 정리를 유추해 낼 수 있기 때문에 설계의 노하우를 체계화하고 확대하는 데에도 유리하다. [3][4]

Fig. 3에서와 같이 공리적 설계는 4 개의 영역, 즉 고객영역(customer domain), 기능영역(functional domain), 물리영역(physical domain), 가공영역(process

domain)으로 구성된다. 고객영역은 고객의 속성(customer Attributes : CAs) 즉 고객의 취향, 요구들로 특징지어진다. 기능영역에서는 고객의 속성이 기능으로 나타나며 이것은 고객의 요구를 반영할 수 있는 요구기능들(Functional Requirements : FRs)이다. 이 FRs 를 구현하기 위한 구체적인 설계요소는 물리영역에서 설계변수(Design Parameters : DPs)의 형태로 나타난다. 마지막으로 DPs 의 향으로 정의된 설계변수들을 제조(생산)하기 위하여 가공영역으로 이동하여 가공변수(Process Variables : PVs)로 정의되는 프로세스를 개발해야 한다. [2][3]

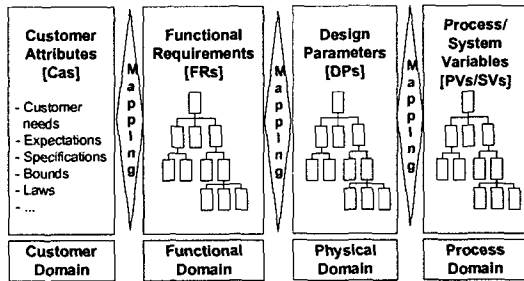


Fig. 3 Four domains of axiomatic design

기능영역에서 물리영역으로 매핑(mapping)을 한다면, 기능영역에서 정의된 FRs 를 만족시키는 DPs 를 물리영역에서 찾아내고, 또 이 DPs 가 만족해야 하는 하위단계의 FRs 를 규명해내야 한다. 이러한 과정은 기능영역과 물리영역 사이에 발생하는 연속적인 매핑으로 진행된다. 즉, FRs 에서 DPs 로, DPs 에서 FRs 로의 매핑이 계속해서 일어나야 한다. 이것이 지그재깅이며 이 과정은 각 영역에서 분해가 모두 완료될 때까지 반복되어야 한다. 지그재깅을 통하여 각 영역(특히 기능영역과 물리영역에서)간의 분해를 수행하면 기능영역에서 명확히 정의된 FRs 에 따른 DPs 를 정확히 규명할 수 있으므로 과다한(필요하지 않는 기능이 적용된) 설계가 나올 우려를 없애준다.

좋은 설계를 얻기 위하여 기본적으로 항상 유지되어야 하는 것으로 독립공리(independence axiom)와 정보공리(information axiom)가 있다. 독립공리는 설계의 요구기능간에 독립성을 유지하라는 것이다. 즉 최적의 설계는 항상 FRs 간의 독립성을 유지하고 있으며, 특정 DP 가 다른 FRs 에는 영향을 주지 않고 해당하는 FR 에만 영향을 줄 수 있도록 조정 가능해야 한다는 것이다. 이 독립공리에 따르는 설계는 좋은 설계라 볼 수 있다.

FR 과 DP 사이의 관계는 Fig. 4 에서와 같이 설계행렬을 이용하여 표현할 수 있고, 그 설계행렬의 형태로써 독립공리의 만족여부를 판단할 수 있다.

비연성 행렬(uncoupled matrix)은 각 DP 가 하나의 FR 에만 영향을 주는 것으로 대각행렬을 이룬다. 따라서 이러한 경우 독립공리를 만족하므로 좋은 설계라 할 수 있다. 비연성화 행렬(decoupled matrix)은 하나의 FR 이 하나 혹은 이상의 DP 로부터 영향을 받는 것으로 삼각행렬을 이룬다. 이때 적절한 DPs 의 변화순서에 따르면 FRs 가 서로 독립이 될 수 있다. 즉, DP1 을 변화시켜 FR1 을 결정한 후, FR2 에 영향을 주는 DP1 은 이미 정해져 있으므로 DP2 만을 변화시켜 FR2 를 결정한다. 마찬가지로 DP1 과 DP2 가 이미 정해져 있으므로 DP3 만을 변화시켜 FR3 을 결정할 수 있다. 따라서 이러한 형태의 설계 역시 주어진 FRs 를 독립적으로 만족시킬 수 있으므로 좋은 설계라고 볼 수 있다. 연성설계(coupled matrix)의 경우는 DPs 가 해당 FR 에만 영향을 주는 것이 아니라 다른 FRs 와 관계를 가지고 있으며 또한 DPs 의 변화순서와 무관하게 FRs 간의 독립성도 보장되지 않는다. 따라서 가장 바람직하지 못한 설계형태이다.

$$\begin{cases} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{cases} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ 0 & 0 & x \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases} \quad \begin{cases} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{cases} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ x & x & 0 \\ x & x & x \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases}$$

(a) Uncoupled (b) Decoupled

$$\begin{cases} FR1 \\ FR2 \\ FR3 \end{cases} = \begin{bmatrix} x & x & 0 \\ 0 & x & x \\ x & x & x \end{bmatrix} \begin{cases} DP1 \\ DP2 \\ DP3 \end{cases}$$

(c) coupled

Fig. 4 Design matrices

정보공리는 독립공리를 만족하는 설계들 중에서 가장 최소한의 정보량(information contents)을 갖는 설계가 상대적으로 가장 좋은 설계라는 것이다. 즉 독립공리에 의하여 비연성 설계이거나 비연성화 설계가 제시되었을 때 이들 중에서 정보공리에 의하여 정보량이 가장 적은 설계를 찾아내는 것이며, 따라서 독립공리를 만족하는 설계안 중에서 가장 좋은 설계를 판정해 내는 기준으로 정보공리가 적용되는 것이다.

### 3. 시뮬레이션을 이용한 생산시스템의 설계 사례

Felix T.S. Chain 은 시뮬레이션 방법론에 따라 그래픽 툴인 SIMFACTORY 를 이용해 계기판 생산과 그에 따른 자동화된 자동차 조립라인을 시뮬레이션 하였다. 그리고 정승환은 ARENA 와 유전알고리즘을 이용하여 셀 배치에 관해 시뮬레이션을 수행하였다. 이외에도 여러 사례들이 있으나 셀 배치 시

물레이션의 예를 문제의 기술과 모델 개발 그리고 분석 및 평가의 가장 큰 골격으로 나누어 설명하고자 한다. [5][6]

### 3.1 문제의 기술

생산시스템의 배치는 복잡한 물류이동경로, 긴 대기시간, 비효율적인 공간 사용, 작업자의 피로 등을 유발하여 결과적으로 제품의 품질과 납기에 나쁜 영향을 줄 수 있으므로 기업의 전략에 맞는 형태의 생산시스템 배치가 필요하다. 제품중심배치와 공정별 배치를 결합한 제품군 배치를 문제의 대상으로, 금속 절삭 가공을 주 공정으로 하는 셀 제조 방식의 생산시스템의 프로세스를 대상으로 하였다.

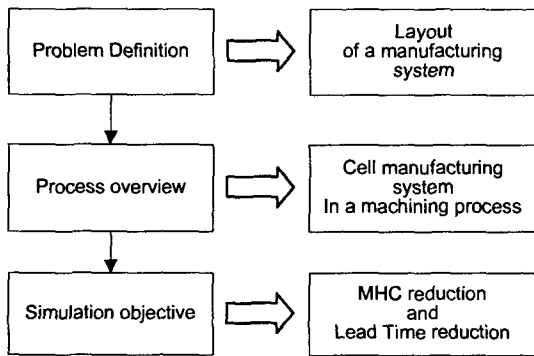


Fig. 5 Problem formulation

따라서 시뮬레이션의 목표가 정해지게 된다. 제품군에 따른 배치를 하게 되면 같은 군에 속하는 제품들은 하나의 제조 셀에 배치하게 되어 부서내의 물류는 많아지는 반면에 부서간의 물류는 적어지게 된다. 즉, 생산시스템 설비 배치를 주어진 공간 안에서의 서로 다른 크기를 갖는 부서들을 가장 효율적으로 배열하는 것이다. 구체적으로는 부서 혹은 공장 면적과 부서의 위치적 제약조건을 고려한 물류 취급 비용(MHC)를 줄이고 명시된 범위의 총 제조 리드 타임을 만족하는 것이다.

### 3.2 모델 개발

주어진 공간 안에서 각 부서들간의 위치를 바탕으로 상세배치안을 얻기 위한 작업을 수행하게 된다. 상세배치안은 정확한 부서의 위치, 통로 구조, 부서내에서 물류의 입출력이 일어나는 곳의 위치, 부서간 레이아웃에 대한 정보로 구성된다. 따라서 수집해야할 데이터로 부서와 부서간의 흐름과 단위 하중을 부서간에 움직이는 비용 그리고 근접성을 정량화한 수치를 필요로 한다.

물류 취급 비용은 부품의 가공을 위해 이동되는 평균 이동거리로 측정하였고 총 제조 리드타임을

만족시키기 위해서 시뮬레이션 소프트웨어인 ARENA 4.0 을 사용하였다. 셀 구성과 셀 배치는 각각 절차적으로 고려되며 클러스터링, 셀 구성, 셀 배치, 평가의 순서로 구현하였다. 효과적인 설비 배치를 위해서 물류이동비용과 생산시스템의 운전특성을 나타내주는 여러 지표들을 동시공학적으로 고려하였고 순열 문제 해결을 위해 새로운 유전 알고리즘의 아키텍처와 연산자를 개발하였고 이를 적용하였다. 특히 기존의 배치 알고리즘의 결과의 직관성과 가독성을 높이기 위해 장면 그래프 기반 3 차원 라이브러리를 개발하여 구현된 솔루션의 결과를 표시하는데 이용하였다. Fig. 6 은 레이아웃 결과의 평가가 인터랙티브하게 이루어지도록 개발된 가상 모듈이 전체 시스템에서 어떠한 역할을 하는지 나타낸 것이다.

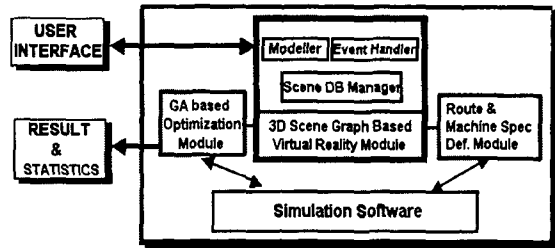


Fig. 6 Integrated framework for the design of manufacturing system

Fig. 7 은 CMDS(Cellular Manufacturing system Design System)에서 설정된 데이터와 여러정보를 기반으로 ARENA 로 시뮬레이션된 결과이다.

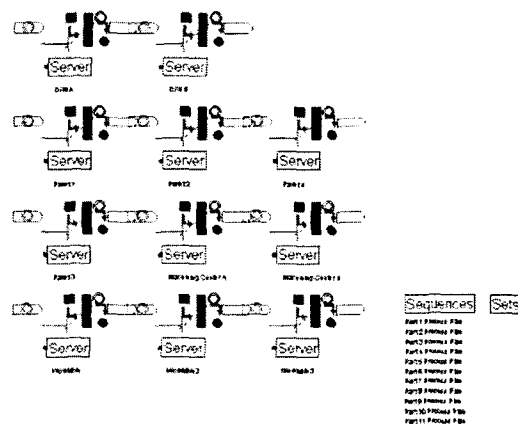


Fig. 7 The ARENA model

### 3.3 분석 및 평가

시뮬레이션 실행 결과로서 제출하는 보고서는 각 파트의 사이클 타임과 대기시간, 자원 가동률, 자원

가용량과 대기행렬의 길이 등의 통계치, 그리고 부품 상태별 총 개수에 대한 정보를 가지고 있다.

이로서 최적화된 각 셀들을 대상으로 셀 간의 물류 이동과 거리를 기반으로 셀 구성에 적용된 것을 보여주고 동일한 배치 휴리스틱과 최적화 알고리즘이 적용된 것을 보인다.

#### 4. 공리적 설계를 이용한 생산시스템의 설계 사례

다양한 부품을 생산할 수 있는 유연생산시스템에 대해서 공리적 설계 방법론을 적용한 사례가 제시되어 있다. 제시된 사례의 목적은 생산시스템의 수명동안 제품들의 혼합군(a mix of products)을 생산할 수 있는 생산시스템을 설계하는 것이다. [7]

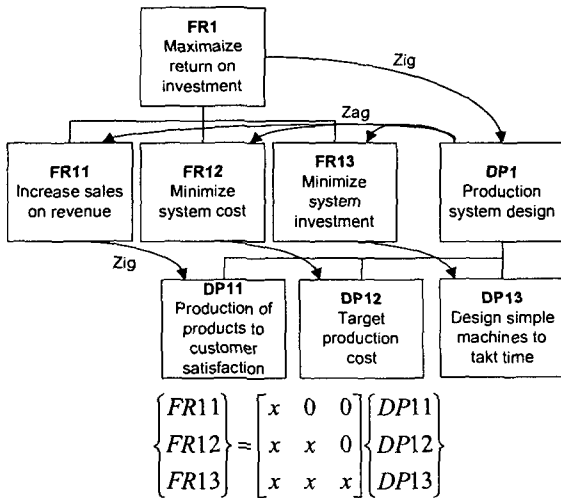


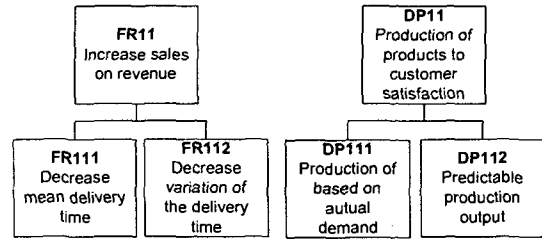
Fig. 8 Level 1 and 2 FRs and DPs and design matrix

Fig 8 에 최상위 2 단계와 두 번째 단계의 설계행렬이 나타나 있다. 생산시스템의 목표, 즉 최상위 FR1 은 회사의 투자회수(Return On Investment)를 최대화하는 것이다. 이를 만족하도록 생산시스템 설계가 이루어져야 한다. 두 번째 단계의 FR 들은 다음의 공식에 의해서 유도되어 진다.

$$ROI = \frac{Sales - Cost}{Investment}$$

FR11 은 판매수입을 증가, FR12 는 생산비의 최소화 그리고 FR13 은 생산투자의 최소화를 나타낸다. 고객만족을 시키는 제품은 판매수입의 증가를 야기 할 것이고, 생산비는 목표를 정하여 도달하려고 노력할. 경우 비용감소의 효과가 나타날 것이며, 투자 시에는 이 시스템을 분석하여 장단점을 파악하여

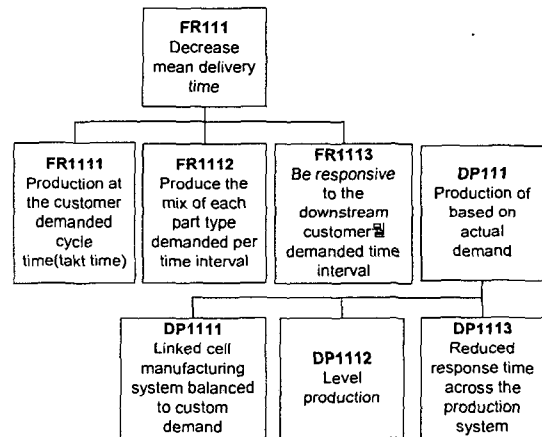
적은 투자비용으로 생산효과를 원하는 만큼 나타나도록 해야 한다. 두 번째 단계의 설계행렬은 비연성화 행렬이다. 따라서 DP11(고객만족을 최대화하는 제품생산)은 앞의 3 개의 FR 모두에게 영향을 미치고, DP12(목표생산비)는 생산비 및 생산투자의 최소화에 영향을 미친다.



$$\begin{cases} FR111 \\ FR112 \end{cases} = \begin{bmatrix} x & 0 \\ x & x \end{bmatrix} \begin{cases} DP111 \\ DP112 \end{cases}$$

Fig. 9 FRs and DPs and design matrix for decomposition of FR11

FR11 은 Fig. 9 에서와 같이 분해될 수 있다. 고객만족을 실현하기 위해서는 제품의 평균배달시간과 배달시간의 변동이 감소되어야 한다. 평균배달시간 감소를 위해서는 실제수요에 근거한 생산이 이루어져야 하고 배달시간 변동을 줄이기 위해서는 생산량을 예측해야 한다. 설계행렬이 비연성화 행렬이므로 실제수요에 맞게 생산하는 것은 배달시간 변동의 감소에도 도움을 준다.



$$\begin{cases} FR1111 \\ FR1112 \\ FR1113 \end{cases} = \begin{bmatrix} x & 0 & 0 \\ 0 & x & 0 \\ x & x & x \end{bmatrix} \begin{cases} DP1111 \\ DP1112 \\ DP1113 \end{cases}$$

Fig. 10 FRs and DPs and design matrix for decomposition of FR111

Fig.10, Fig. 11 및 Fig. 12 는 각 FR 과 DP 를 하위 단계로 분해한 결과를 나타내고 있다. 설계행렬이 전부 비연성화 행렬임을 알 수 있다. 즉 독립공리를 만족시키면서 분해가 이루어지고 있다. 따라서 어떤 설계변수 항목이 변화가 생겨도 연결된 몇몇 항목에만 영향을 미치기 때문에 생산시스템 제어 및 관리가 용이해진다.

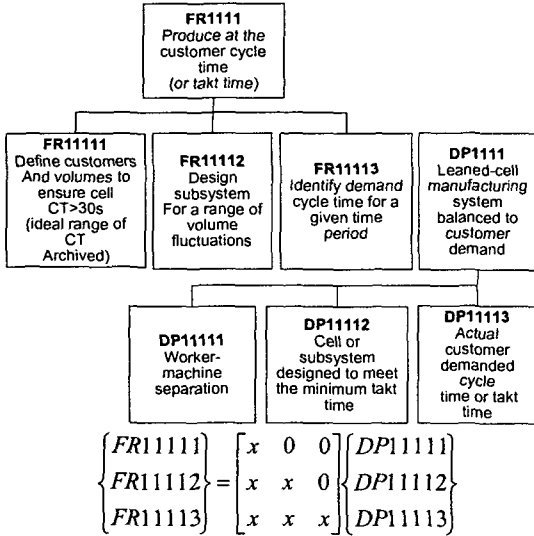


Fig. 11 FRs and DPs and design matrix for decomposition of FR1111

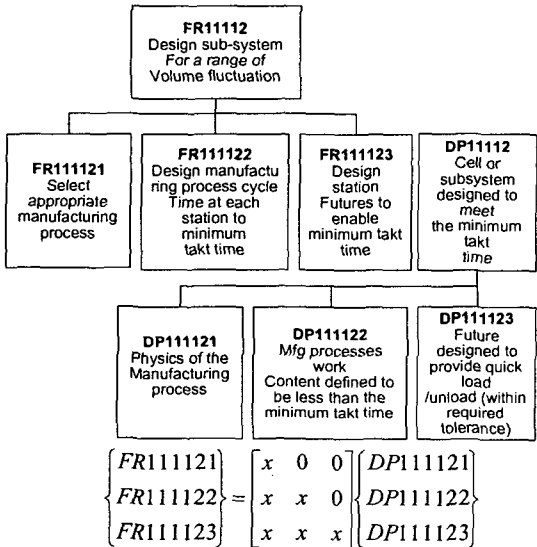


Fig. 12 FRs and DPs and design matrix for decomposition of FR11112

공리적 설계방법을 사용하여 생산시스템의 최상위 목표에서부터 구체적인 설계항목에 까지 분해과정의 사례를 들었다. 이런 분해과정을 통하여 전체

생산시스템의 개념화 설계가 완성된다. 또 물리영역과 가공영역사이에서 각 DP 에 대응하는 공정변수가 정해지는 사상과정이 이루어진다. 그 결과 정해진 공정변수를 가지고 실제 생산시스템이 구축된다.

## 5. 고찰

생산시스템을 설계하는 방법론 중 시물레이션과 공리적 설계의 방법과 그 사례를 알아 보았다. 시물레이션은 설계 접근방안보다는 설계의 개발 즉, 대상의 모델링에 중점을 둔다. 그리고 기존에 설계된 모델을 재설계하여 분석 및 평가를 하고 문제점을 발견하여 대안을 발견하고자 한다. 따라서 비슷한 여타의 시물레이션 방법을 보면 체계적인 설계 접근을 하지 않아 설계방향이나 목적, 구현 등에 있어 오류를 나타낼 가능성이 많다. 새로운 생산시스템 설계에는 많은 요구조건과 목적이 존재하므로, 새로운 문제 해결을 위한 방법론이 필요하다. 반면에 공리적 설계는 설계를 어떠한 방식으로 접근하는지, 목적에 대응하는 방안은 무엇인지, 그리고 최종 개발단계까지 이용할 수 있는 통합적인 접근 방법이다. 기존의 설계 문제들에 대한 통합적이고 체계적인 방법으로서, 생산시스템의 설계에 있어서도 유용하게 활용될 수 있다고 사료된다.

## 참고문헌

1. Kenneth Preiss, "A Systems Perspective of Lean and Agile Manufacturing", *Agility & Global Competition*, Vol. 1, No. 1, p59~76, 1997
2. C. Dennis Pegden, Robert E. Shannon, Randall P. Sadowski, "Introduction to Simulation Using SIMAN", McGraw-Hill Inc., 1995
3. Nam. P. Suh, "Axiomatic Design : Advances and Applications", Oxford University Press, 2001
4. 오창훈, 여동한, 이인환, 고진, "공리적 설계개념에 근거한 Power Steering 품질개선", *자동차기보*, 97 하, p292~306, 1997
5. Chan, Felix T.S., and Jiang, Bing, "Simulation-aided design of production and assembly cells in an automotive company," *Integrated Manufacturing Systems*, Vol. 10 No. 5, 1999
6. 정승환, "셀 제조 시스템에서 VR 기법을 이용한 셀 구성과 셀 배치에 관한 연구," 성균관대학교 대학원 석사학위 논문, 2000
7. David S. Cochran, "Mass vs. Lean Design Evaluation Using the Production System Design Decomposition", *Transaction of NAMRI/SME*, Vol. 28, 2000