

자동생산시스템의 분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션

조 규갑*, 오 수철**, 이 문욱**, 양 태용***

Computer Simulation for Analysis of Flexible Manufacturing Systems

Kyu-Kab Cho*, Soo-Cheol Oh**, Moon-Wook Lee**,
Tae-Yong Yang***

ABSTRACT

This paper discusses the analysis of flexible manufacturing systems design using computer simulation method. The simulation language employed is SIMAN which is a powerful tool to model flexible manufacturing systems.

The important characteristics of FMS, its design and operational problems, and structures based on the number of NC machine tools and their layout are discussed for the applications of FMS to manufacturing.

A new algorithm for forming part families and machine groups has been proposed and its software is also developed.

Simulation procedure using SIMAN for analysis of FMS designs is discussed and two design problems are analyzed and evaluated to illustrate systematic procedure for analysis of FMS.

1. 서 론

최근에 다양한 제품의 수요가 증가하고, 동시에 제품의 수명사이클이 짧아져가는 추세로 인하여 생산형태가 대량 생산에서 서서히 다중소량생산으로 옮겨가고 있다. 다중 소량생산시스템에서 대량생산방식에 가까운 효과를 얻어서 생산성을 향상시키고자 하는 새로운 생산시스템인 「셀제조시스템 (cellular manufacturing system)

이 최근에 출현하였다. 다중소량생산에 대한 자동화를 의미하는 「플렉시블 오토메이션 (flexible automation)」의 개념에 의해서 셀제조시스템이 고도로 자동화된 자동생산시스템이 「플렉시블 제조시스템 (Flexible Manufacturing systems, FMS)이다. FMS는 여러가지의 자동화된 생산의 고유 기술 및 관리기술 즉, NC공작기계, 자동공구교환장치 (Automatic Tool Changer), 자동자재반송시스템 (Automatic Material Handling System)

* 부산대학교 산업공학과

** 부산대학교 대학원 기계공학과

*** 한국 과학과학기술원 산업공학부

자동창고, 그룹 테크놀로지(Group Technology, G.T)의 개념, 컴퓨터 및 운용소프트웨어 등을 하나의 생산시스템으로 총합화한 것이다.^{2,3)}

FMS의 성공적 실현은 시스템을 구성하는 하드웨어의 최적 선정뿐만아니라, 이 시스템내에서의 가공물의 흐름을 제어하는 소프트웨어의 운용기법에도 달려 있다. 따라서, FMS의 설계 시에는 시스템의 구성요소와 운용기법에 대한 여러가지의 설계대안을 비교분석하여 가장 효율적인 대안을 선정하는 방법의 개발이 중요한 과제이다.

FMS의 설계대안을 분석하는 데는 일반적으로 해석적방법과 컴퓨터 시뮬레이션방법의 두 가지 접근방법이 있다.⁴⁾ 최적화기법을 이용하는 해석적 방법은 수학적 모델이 설정시에 도입한 가정 때문에 복잡한 FMS의 상세한 동적 거동을 분석하기가 어려우므로, 부분적이고 대략적인 성능평가에만 국한되고 있다. 컴퓨터 시뮬레이션방법은 복잡다양하고 동적 특성을 지닌 FMS의 상세한 부분까지 모델링이 가능하므로 설계분석 및 성능평가가 쉬울뿐만 아니라, FMS의 구성요소의 변화에 따른 민감도 분석(Sensitivity analysis) 및 효율적인 운용기법을 결정할 수 있으므로 최근에 컴퓨터 시뮬레이션방법의 사용이 증가하고 있다.⁵⁾

FMS의 시스템분석을 위한 컴퓨터 시뮬레이션에 소요되는 비용과 시간을 대폭 감소시킨 시뮬레이션 언어가 최근에 많이 개발되어 있다. 그 가운데서 일반적 시스템의 시뮬레이션에 대한 특성은 물론, 특히 자동생산시스템의 시뮬레이션 모델링에 필요한 특성을 결합시킨 새로운 시뮬레이션언어인 SIMAN(Simulation Analysis)이 최근에 개발되어 널리 활용되고 있다.⁶⁾ 특히, SIMAN은 FMS의 설계분석 및 성능평가를 위해서 사용자의 목적에 맞도록 쉽게 모델링을 할 수 있어서 융통성이 아주 높고, 시간과 비용이 적게 소요되며, 결과분석의 용이성 등의 여러가지 장점을 가지고 있다.^{7,8)}

본 연구는 다종 소량생산에 대한 자동 생산시스템인 플렉시블제조시스템(FMS)의 분석을 SIMAN을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션방법을 도입한

연구이다. 연구의 목적은 FMS의 특성과 구조적 분류, SIMAN의 FMS시뮬레이션에 대한 특성의 고찰, FMS의 설계에 기초가 되는 부품 및 기계 그룹의 형성에 관한 기법의 개발, SIMAN을 사용한 FMS의 시뮬레이션모델링과정 및 시뮬레이션의 결과를 분석하여 FMS의 설계 및 운용에 관한 시스템분석의 접근방법을 제안하고자 한다.

2. FMS의 특성 및 기존연구의 고찰

2-1. FMS의 구성과 구조적 분류

FMS의 정의는 지금까지 여러가지가 제안되어 있으나,^{2,5,9-15)} 아직도 하나의 통일된 정의가 확립되어 있지 않은 상태이다. 일반적으로 FMS는 다종 소량생산시스템에서 생산성과 유연성(flexibility)의 향상을 위한 자동 생산시스템이다.

FMS는 플렉시블오토메이션의 개념에 의해서 여러가지의 요소기술로 구성된 하나의 자동화된 토탈시스템(total system)으로서, FMS를 구성하는 설비의 기종과 기능에 따라서 요소기술을 기종별 및 기능별로 구분할 수 있다.^{2,3)} 기종별 구분은 FMS를 구성하는 장치에 따라서 ①N-C공작기계, ②자동착탈장치(Automatic Loading / Unloading System), ③자동자재반송설비 ④자동창고, ⑤컴퓨터로 나눌 수 있고, 기능별 구분은 FMS의 구성장치의 기능을 고려하여 ①자재의 흐름에 관련된 기계적동작기능, ②계산 및 제어기능, ③정보의 흐름에 관련되는 관리정보 및 CAM(Computer Aided Manufacturing)정보, ④자동운전감시기능으로 구분할 수 있다.

FMS의 분류는 자재반송시스템의 이동경로나 가공물의 가공특성 등에 따라서 구분할 수 있으나, 본 연구에서는 NC공작기계의 대수와 배치의 관점에서 본 구조적 분류를 고찰한다. FMS의 구조적 분류는 다음과 같이 나눌 수 있다.^{9,11, 14,15)}

- (1) 플렉시블제조 모듈(Flexible Manufacturing Module, FMM)
- (2) 플렉시블제조 셀(Flexible Manufacturing Cell, FMC)
- (3) 플렉시블제조 그룹(Flexible Manufacturing

Group, FMG)

(4) 플렉시블생산시스템 (Flexible Production System, FPS)

(5) 플렉시블제조 라인 (Flexible Manufacturing Line, FML)

FMM은 1 대의 NC 공작기계, 부품완충 저장 지역(part buffer), 공구 및 팔릿트(pallet) 교환 설비 또는 로봇으로 구성되는 가장 간단한 구조이다. FMC는 여러개의 FMM으로 구성되며, 제품별 또는 공정별 배치가 가능하다. FMG는 제조 부문별로 FMC나 FMM을 배치해서 구성되며, FPS는 FMG로 구성되며, FML은 특정한 부품가공용의 NC 공작기계의 집합이다. 이상의 FMS의 5 가지의 구조적 분류형태에 대한 부품의 연간생산량 및 부품수에 대한 관계가 Fig. 1에 표시되어 있다.^{12, 15)}

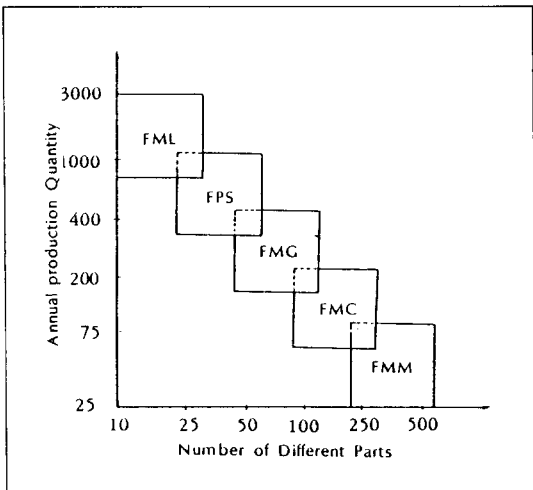


Fig. 1. Relationships of Types of FMS, Number of Parts and their Production Quantity (15)

2 - 2. FMS에 대한 기존연구의 고찰

FMS에서 주요 연구분야는 시스템의 구성요소의 최적선정에 관련되는 설계분야와 시스템의 최적관리에 관계되는 운용기술분야의 두 가지 분야이다.

설계분야에는 부품그룹의 형상, 기계의 유연성을 고려한 NC 공작기계의 선정, 자재반송시

시스템의 선정, 자동공구교환설비의 선정, 컴퓨터 시스템의 선정 및 시스템의 모든 구성요소를 총합화하는 제조시스템의 레이아웃(layout)의 결정등이 주요대상의 문제이며, 이 각각은 대단히 복잡한 문제이다.

운용기술분야에는 전반적 생산계획문제, 기계부하에 관련이 되는 부품, 기계, 투울링 등의 그룹화문제, 설비능력의 밸런싱에 관계되는 기계부하문제 및 스케줄링 문제 등이 중요한 과제이다.

FMS의 설계 및 운용의 분석 및 평가에 대한 해석적 방법과 컴퓨터 시뮬레이션방법에 의한 기존의 연구결과를 간단히 고찰한다.

해석적방법에 의한 연구결과중에 최적화기법을 이용한 것에 관해서 Stecke¹⁵⁾이 제안한 5 가지 분야에 대해서 살펴 보면, (1)주어진 셀(cell)에서 가공이 가능한 가공물의 집합의 선정 및 (2)같거나 유사한 가공을 수행할 수 있는 기계그룹의 형성에 대한 Stecke^{16, 17)} 및 Kusiak¹⁸⁾의 연구, (3)생산할 각 부품의 상대적 생산비율을 결정하는 생산비율문제 및 (4)선정된 부품그룹에 소요되는 투울링의 할당문제에 대한 Stecke¹⁵⁾의 연구, (5)기계부하및 스케줄링 문제에 대한 Stecke¹⁵⁾, Stecke과 Solberg¹⁹⁾ 및 Kusiak²⁰⁾의 연구 등이 있다. 이들 연구에서는 0 - 1의 선형(linear) 또는 비선형(non linear) 계획법을 주로 사용하고 있으며, 모델화과정에서 많은 가정을 도입하고 있고, 또 분석에 필요한 데이터를 구하기 힘들어서 실제 적용에는 문제점이 있다.

한편, 대기이론(queueing theory)을 도입한 FMS의 성능평가에 대한 대표적인 연구는 Solberg의 CAN-Q (Computer Analysis of Networks of Queues)²¹⁾와 Hildebrant의 MVA (Mean Value Analysis) 및 MVAQ (Mean Value Analysis of Queues)^{22, 23)} 등이 있다. 이들은 FMS를 폐쇄대기네트워크(closed queueing network)로 간주하여 블로킹(blocking)이 일어나지 않는다는 가정하에서 시스템이 안정상태가 되었을 때 시스템의 대략적인 성능평가를 할 수 있으므로 FMS와 같이 동적으로 변화하는 경우에는 실제 적용이 어렵다. 그러나 CAN-Q 모델은 FMS의 다

양한 계획 및 통제에 대한 연구에 많이 적용되고 있다.²⁴⁾ 한편, FMS를 개방대기네트워크(open queueing network)로 가정한 연구가 Buzacott,²⁵⁾ Buzacott 와 Shanthikumar²⁶⁾, Dubois²⁷⁾ 등에 의해 수행되었으며, 이들은 제한된 저장 지역을 고려한 것이 특징이다.

컴퓨터 시뮬레이션방법에 의한 연구에는 FMS의 시뮬레이터(simulator)의 개발에 관한 연구와 범용 또는 제조시스템전용의 시뮬레이션언어를 사용하는 2가지의 주된 연구가 있다. FMS시뮬레이터의 사용시에는 융통성이 없다는 단점이 있으나 사용의 편의성때문에 여러가지의 시뮬레이터가 개발되어 사용되고 있다.²⁸⁾ 한편, 범용 및 제조시스템 전용의 소프트웨어를 사용한 FMS의 설계 및 운용에 관한 컴퓨터 시뮬레이션의 연구가 많이 제안되어 있다.^{5,7,8,29-41)} 이 연구들의 주요분야는 FMS도입의 예비조사 및 타당성분석, FMS의 주요 구성요소에 대한 설계분석, 제안된 시스템의 평가, 설비배치, 기계부하 및 스케줄링에 관한 기법의 비교분석, 장애계획에 대한 예측등에 관한 내용을 위주로 하고 있다.

3. 제조시스템 모델링의

문제점 및 SIMAN의 특성

3-1. 제조시스템의 모델링의 문제점

일반적인 제조시스템 또는 FMS의 설계분석및 성능평가를 위해서 범용 시뮬레이션 언어에 의한 모델링과정에 다음과 같은 문제점이 있다.⁶⁾

- (1) 대규모의 제조시스템에서 개별 작업 센터(work center)나 셀(cell)의 모델링문제
- (2) 기능상 대등한 여러가지 작업센터의 모델링을 하나의 Macro 모델로서 대처하는 문제
- (3) 각 가공물의 공정계획에 의한 가공순서, 준비시간, 가공시간, 소요 공구에 대한 가공물의 흐름의 통제에 대한 모델링기법
- (4) 각 작업센터간의 작업부하의 할당에 관한 자원(resource)의 스케줄링문제
- (5) 자재반송시스템의 거동에 대한 모델링문제 이론적으로는 모델링에 소요되는 시간과 경비

를 고려하지 않으며 범용의 시뮬레이션언어로써 위의 문제점을 해결하여 모델링을 할수는 있으나, 이것은 비효율적이며 비경제적이다. 특히, 자재 반송시스템의 모델링의 경우에는 더욱 어려운 문제가 야기된다.

이같은 문제의 해결을 위해서 제조시스템, 특히 FMS의 설계 및 운용의 분석 및 성능평가에 유용한 시뮬레이션언어중의 하나가 SIMAN이며, 이의 특성을 다음에 간략히 고찰한다.

3-2. SIMAN의 특성

SIMAN의 모델링의 기본특성은 시스템의 정적, 동적인 특성을 정의하는 시스템모델(system model)과 이 모델을 컴퓨터에서 실행시에 필요한 조건이나 입력을 정의하는 실험적 구조(experimental frame)로 구성되어 있다는 것이다. 따라서, 시스템모델의 변경이 없이 단지 시뮬레이션의 조건만 변경시킴으로써 여러가지의 상황하에서의 시뮬레이션이 가능하다. 또 SIMAN은 이산변화시스템(discrete change system), 연속변화시스템(continuous change system)및 이산-연속조합시스템(combined discrete-continuous system)의 3가지 모델을 하나의 시스템 모델로 결합시킬 수 있는 특성을 가지고 있다.⁶⁾

SIMAN은 일반적인 시스템의 모델링 및 분석에 유용할뿐만아니라, 앞에서 고찰한 제조시스템의 컴퓨터 시뮬레이션의 모델링과정에서 생기는 문제점을 쉽게 해결할 수 있는 다음의 특성을 가지고 있다.

- (1) STATION블록(block)을 사용한 개별 작업센터의 모델링의 기능
- (2) 기능상 대등한 여러 개의 작업센터의 모델링을 하나의 Macro Submodel로 모델링이 가능
- (3) TRANSFER블록과 SEQUENCES 요소의 사용에 의한 가공순서의 모델링
- (4) SCHEDULES요소에 의한 자원스케줄링(resource scheduling)의 모델링
- (5) TRANSFER블록과 CONVEY블록을 사용한 자재반송시스템의 모델링

SIMAN의 소프트웨어의 구성, 블록(block)의 개념, 모델링의 방법, 출력 분석 등의 상세한

내용은 참고문헌[6]을 참조바란다.

4. FMS에서 부품

- 기계그룹의 형성기법 개발

4-1. 부품-기계그룹화의 개요

FMS의 효율적 설계와 운용을 위해서 생산대상 제품의 종류와 연간생산량이 설정되면, 이에 적합한 FMS의 시스템 구성을 위해서 부품및 기계의 그룹화가 GT의 개념에 의해서 선행되어야 한다. 즉, FMS에서 생산할 제품혼합(product mix)을 위한 부품그룹의 선정과 이 부품그룹들의 가공에 필요한 NC공작기계의 형식및 대수를 고려한 기계그룹을 설정해서, 설계자는이 정보를 이용해서 기본적인 하드웨어의 구성 및 설비배치계획을 실시하여 개략적인 FMS의 설계대안을 개발해야한다.

부품-기계그룹의 형성방법에는 직관적방법, 생산흐름분석및 분류코우딩시스템에 의한 방법 등이 있으나, 설비배치계획의 측면에서 보면 생산흐름분석(Production Flow Analysis, PFA)이 유효한 접근방법이다. 생산흐름분석은 Burbidge⁴²⁾가 최초로 개발한 이래로, McAulley의 유사성계수(similarity coefficient)를 이용한 방법⁴³⁾, McCormick의 결합에너지방법(bond energy method)⁴⁴⁾, King과 Nakornchai의 Rank Order Clustering(ROC)방법^{45,46)}, Chan과 Milner의 Direct Clustering Algorithm(DCA)⁴⁷⁾, Kusiak의 p-median 및 행렬을 이용한 방법¹⁸⁾, Purchek의 집합론을 이용한 방법⁴⁸⁾ 등이 개발되어 있다.

본 연구에서는 기존의 방법보다 효율적이며, 데이터의 변화에 상관없이 일치된 결과를 얻을 수 있는 새로운 부품-기계그룹의 형성기법을 개발하여 제안한다.

4-2. 부품

기계그룹 형성의 발전적 기법의 개발

생산흐름분석은 부품의 가공공정의 흐름을 관찰해서 부품및 기계그룹을 형성하는 방법으로, 일반적으로 공장내의 흐름분석, 부서내의 그룹

분석및 GT라인(line)과 GT셀(cell)의 분석의 3 단계로 시행한다.^{42,43,50)} 생산흐름분석을 위해서는 작업지시서에 주어진 가공경로의 정보를 이용하여 부품-기계행렬(part-machine matrix)을 만들어서 이 자료를 사용하여 부품그룹과 기계그룹을 체계적으로 형성한다.

Fig. 2는 부품-기계행렬의 간단한 보기이며, 행렬의 요소 a_{ij} ($i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m; i$ 는 부품인덱스이고, j 는 기계인덱스를 표시함)에 1 또는 0의 값을 다음과 같이 할당한다(공란은 0를 의미함)

$$a_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{부품 } i \text{가 기계 } j \text{에서 가공되는 경우} \\ 0, & \text{부품 } i \text{가 기계 } j \text{에서 가공이 안되는 경우} \end{cases}$$

Machine Part	m_1	m_2	m_3	m_4	m_5
P_1	1	1	1	1	
P_2	1	1	1		
P_3	1				
P_4	1	1			
P_5			1		1
P_6			1		1

Fig. 2. Part-Machine Matrix

부품-기계행렬에서 각 행(row)과 열(column)에 대해서 a_{ij} 의 값의 합계를 각각 R_i 및 C_j 라 하면, 다음과 같이 주어진다.

$$R_i = \sum_{j=1}^m a_{ij} \quad (i=1, 2, \dots, n) \tag{2}$$

$$C_j = \sum_{i=1}^n a_{ij} \quad (j=1, 2, \dots, m)$$

기계 m_j 에서 가공할 부품의 집합을 편의상 P_j 로 나타내면, Fig. 2의 자료로부터 $P_1 = \{P_1, P_2,$

$P_3, P_4\}$ 이고 $P_2 = \{P_1, P_3, P_4\}$ 등으로 나타낼 수 있다. 이 예에서 $P_1 \supset P_2$ 이므로 기계 m_2 에서 가공되는 모든 부품은 기계 m_1 에서도 가공해야 함을 의미한다. 따라서 각 기계가 가공할 부품의 집합간의 상호관계를 분석함으로써 기계그룹의 형성이 가능하다.

두대의 기계 m_k 와 m_j ($k \neq j, k = j = 1, 2, \dots, m$)에서 가공되는 부품의 집합 P_k 와 P_j 에 대해서 기계 m_j 를 기준으로 한 P_k 와 P_j 의 상호관련도 r_{kj} 를 식(3)과 같이 정의한다.

$$r_{kj} = n\{P_k \cap P_j\} / n\{P_j\} \dots\dots\dots(3)$$

식(3)에서 $n\{P_j\}$ 는 집합 P_j 의 요소의 수를, $n\{P_k \cap P_j\}$ 는 집합 P_k 와 P_j 의 교집합(intersection)의 요소의 수를 나타낸다. 또 $n\{P_j\} \leq n\{P_k\}$ 라 가정한다.

일반적으로,

$$r_{kj} \neq r_{jk}$$

의 관계가 있으며, r_{kj} 의 값은 $0 \leq r_{kj} \leq 1$ 의 범위내에 있다. 여기서 r_{kj} 의 값에 따라서 두 집합 P_k 와 P_j 의 관계를 알 수 있다.

(1) $r_{kj} = 1$ 의 경우에는 집합 P_k 는 P_j 의 확대집합(super set) 또는 집합 P_j 는 P_k 의 부분 집합임을 의미한다. 따라서, 두 기계 m_k 와 m_j 는 같은 기계그룹에 속함을 의미한다.

(2) $r_{kj} = 0$ 의 경우에는 집합 P_k 와 P_j 는 서로 공통인 요소가 없으므로 서로 소집합(disjoint set)이다. 따라서 기계 m_k 와 m_j 는 각각 다른 기계그룹에 속함을 의미한다.

(3) r_{kj} 가 $0 < r_{kj} < 1$ 인 경우에는 집합 P_k 와 P_j 는 서로 공통인 요소가 있으나, 두 집합이 확대집합 또는 부분집합의 관계가 없음을 알 수 있다.

따라서, 기계그룹은 각 부품을 가공하는데 소요되는 기계들간의 상호관련도가 높은 기계끼리 차례로 결합함으로써 형성된다. 한편, 부품그룹의 형성은 정해진 각 기계그룹 G_ℓ ($\ell = 1, 2, \dots, M, M$ 은 기계그룹의 수이며, $M \leq n$ 이다.)에서 모든 가공이 완료되는 부품의 합집합(union)을 구해서 할당하고, 할당이 되지 않은 부품에 대해서는 $\max_{1 \leq \ell \leq M} [n\{G_\ell\} / n\{\pi_i\}]$ 의 값을 주는 기계그룹에 차례로 할당하면 된다. 여기서

$n\{G_\ell\}$ 은 할당하고자 하는 부품이 기계그룹 G_ℓ 에서 가공이 가능한 공정수를 나타내며, $n\{\pi_i\}$ 는 할당해야 할 부품 p_i 의 소요가공공정의 총수를 의미한다.

이상의 분석을 기초로 하여 개발한 부품-기계그룹형성의 발견적기법의 절차를 요약하면 다음과 같다.

[부품-기계그룹의 형성기법의 절차]

1. 부품-기계행렬에서 C_j ($j = 1, 2, \dots, m$)의 값을 구해서 C_j 의 값이 증가하지 않는 차례로 기계를 배열한다.

2. r_{kj} ($k = j = 1, 2, 3, \dots, m$)의 값을 요소로 하는 상호관련도의 행렬 R 을 구한다 ($k \neq j$ 이며, $r_{jj} = 1$ 로 둔다)

3. (1)행렬 R 의 각 행과 열에서 $r_{kj} = 1$ (단, $k = j$ 의 경우는 제외)인 기계쌍(machine pair)을 검색하여 공통의 기계를 가지는 요소를 결합하여 차례로 기계그룹을 형성한다.

(2)모든 기계가 기계그룹에 할당되었으면 단계 4로 가고, 그렇지 않으면 할당해야 할 기계들의 r_{kj} 의 값이 가장 큰 기계가 있는 기계그룹에 순차적으로 할당한다.

4. 각 기계그룹내의 기계를 C_j 의 값이 증가하지 않는 순서로 각 기계그룹내에서만 기계를 재배열한다.

5. (1)각 기계그룹에 속하는 기계에 대응하는 집합 P_j ($j = 1, 2, \dots, m$)의 합집합(union)을 구하여 각각 대응하는 기계그룹에 부품을 할당한다.

(2)모든 부품이 기계그룹에 할당되었으면 단계 6으로 가고, 그렇지 않으면 할당 대상부품에 대해서 $n\{G_\ell\} / n\{\pi_i\}$ 의 값을 계산하여, 이 값이 가장 큰 기계그룹 ℓ ($\ell = 1, 2, \dots, M$)에 부품을 순차적으로 할당한다.

6. 각 기계그룹에 속하는 부품들을 부품인덱스의 값이 감소하지 않는 순서로 그룹내에서만 부품을 재배열하고, 과정을 중지한다.

앞의 절차에서 (1)~(4)의 과정은 기계 그룹의 형성과정이고, (5)~(6)은 각 기계그룹에 속하는 부품그룹을 형성하는 과정이다.

4-3. 발견적 기법의 적용 및 평가

개발한 기법을 예외 부품이 없는 경우 및 예외 부품과 애로기계가 있는 경우에 적용해 본다.

(1) 예외 부품이 없는 경우.

하나의 기계그룹에 할당된 부품그룹에 속하는 모든 부품이 그 기계그룹에서만 모든 필요한 가공이 완료되는 경우, 즉, 예외 부품이 없는 경우에 대하여 Fig. 3에 주어진 자료⁴⁷⁾에 대해서 적용해 본다.

이 문제에서 R행렬의 계산결과는 Fig. 4와 같으며, 개발된 기법의 적용결과는 기계그룹이 $\{m_{14}, m_9, m_4, m_1, m_6, \}, \{m_{15}, m_{13}, m_8, m_5, m_3, \}, \{m_2, m_{12}, m_{11}, m_{10}, m_7, \}$ 로 3개가 형성되며, 각 기계그룹에 속

하는 부품그룹은 $\{p_3, p_4, p_6, p_9, \}, \{p_2, p_5, p_8, \}, \{p_1, p_7, p_{10}, \}$ 으로 각각 형성된다. 이의 최종 결과가 Fig. 5에 주어져 있다.

COMP NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2		1									1	1	1		
3			1		1									1	1
4	1					1				1					1
5				1	1	1			1					1	1
6	1			1	1	1			1	1				1	1
7		1					1			1	1	1			
8			1		1			1						1	1
9				1	1	1			1						1
10	1						1			1	1	1			

Fig. 3. Original Part-Machine Matrix : Case for no exceptional elements

M/C	9	14	3	4	5	6	8	1	10	11	12	13	2	15	7
9	1.00														
14	1.00	1.00													
3	0.00	0.00	1.00												
4	1.00	1.00	0.00	1.00											
5	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00										
6	1.00	1.00	0.00	0.67	0.00	1.00									
8	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00								
1	1.00	1.00	0.00	0.67	0.00	0.67	0.00	1.00							
10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00						
11	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00					
12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00				
13	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00			
2	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00		
15	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.00	1.00	
7	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	1.00	0.00	1.00	0.00	1.00

Fig. 4. Matrix R-Computed Value of r_{kj}

COMP NO.	14	9	4	1	6	15	13	8	5	3	2	12	11	10	7
1															
2	1	1		1	1										
4	1	1	1	1	1										
6	1	1	1	1	1										
9	1	1	1		1										
2					1	1	1	1	1						
5					1	1	1	1	1						
8					1	1	1	1	1						
1												1	1	1	1
7												1	1	1	1
10												1	1	1	1

Fig. 5. Final Part-Machine Matrix

COMP NO.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1															
2		1				1	1			1	1			1	1
3			1											1	1
4	1			1											1
5					1				1	1	1			1	1
6						1	1							1	1
7		1					1					1	1		
8	1			1	1	1								1	
9			1	1		1	1							1	1
10								1	1	1				1	1

Fig. 6. Part-Machine Matrix : Case for exceptional elements and bottleneck machine

COMP	14	3	4	1	6	11	2	12	7	6	15	13	10	9	8	5
1																
4	1	1	1	1	1											
6	1	1	1	1	1											
9	1	1	1		1											
1						1	1	1	1	1						
6						1	1	1	1	1						
7						1	1	1	1							
2																
5											1	1	1	1	1	1
10											1	1	1	1	1	1
15											1	1	1	1	1	1

Fig. 7. Final Part-Machine Matrix with Exceptional Elements and Bottleneck Machine

이 경우에 p_6 과 p_9 가 예외부품이고, m_6 이 2개의 기계그룹 G_1 과 G_2 에 속해야 하므로 애로 기계가 된다.

개발된 기법을 예외부품이 있거나 또는 없는 경우, 애로기계기 있는 경우 및 이들의 조합으로 형성되는 경우에 대해서 그 결과를 사전에 알 수 있는 문제를 작성해서 적용해 본 결과는 모두 최적의 결과를 얻었다. 특히, 예외부품이 있는 경우에 다른 기법, 예를들면 ROC 방법이나 DCA 방법 등은 주어진 데이터의 행과 열의 위치를 변경해서 얻은 결과는 예외부품의 수가 다르게 나타나는데 비해서 개발된 기법은 항상 같은 결과가 얻어지며 동시에 예외부품의 수도 최소화됨에 다른 기법과 차이가 나는 특성이다.

5. SIMAN을 사용한 FMS의 모델링 및 분석

5-1. FMA의 SIMAN 모델링의 절차

SIMAN의 소프트웨어의 구성을 고려해서 FMS에 관한 SIMAN의 시뮬레이션 모델링 절차를 고찰해 본다. 설계대상시스템의 전반적 생산계획에서 제품의 종류와 생산수량이 결정되면 먼저 GT의 개념에 의해서 부품-기계 그룹을 형성한 정보를 사용해서 FMS의 구조적 설계 즉, 하드웨어의 구성 및 설비배치계획등의 시스템설계를 한다. 그 다음에 FMS의 시스템모델과 시스템의 설계 운용조건을 나타내는 실험 조건을 별도로 작성해서 이 2가지를 결합시켜 실행가능한 SIMAN의 컴퓨터 프로그램을 작성한다. 이때에 사용자의 목적에 따라서 필요시에 별도의 FORTRAN 서브루틴(Subroutine)을 작성해서 본 프로그램에 결합시키는 것이 가능하다. 이 컴퓨터프로그램을 실행하여 얻은 시뮬레이션의 결과를 분석하여 필요에 따라 수정 및 보완을 해서 최적의 설계를 얻는다. 이 과정을 도식적으로 나타낸 것이 Fig. 8에 주어져 있다.

FMS의 시뮬레이션 결과의 분석시에는 각 구성요소의 활용도, 생산량, 부품의 총 처리시간이나 평균체류시간, 공정중 재고 등에 대한 평가가 필요하며, 특히, FMS의 실현에는 저역의

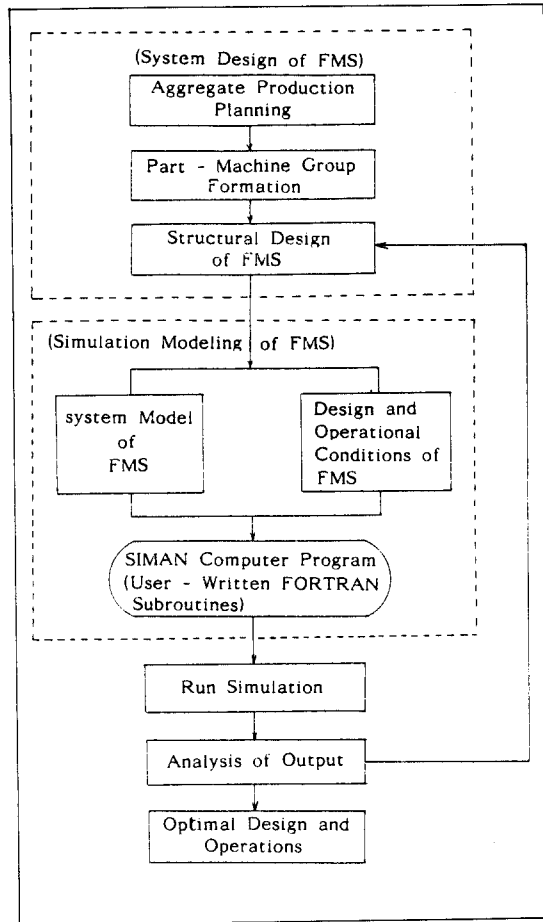


Fig. 8. Modeling procedure of FMS using SIMAN

설비투자가 필요하므로 각 구성요소의 활용도를 높이는 것이 중요하다.

본 연구에서는 FMS가운데서 중요한 플렉시블 제조셀(FMC)과 플렉시블제조 라인(FML)의 설계 및 평가에 대하여 SIMAN을 이용한 모델링 및 분석에 관하여 고찰한다.

5-2. 플렉시블 제조셀의 설계 및 평가

공정별설비배치로 구성된 Job Shop의 모델을 FMC로 변환시키는 설계 및 평가에 관하여 알아 본다.

(1) 모델의 설정

연구대상의 모델은 Schriber⁵¹⁾가 GPSS 모델로 표시한 Job Shop이다. 주어진 모델은 6개의 상

이한 기계그룹으로 구성된 공정별설비배치를 하고 있으며, 각 기계그룹은 다음의 Table 1 에 나타낸 바와 같이 동일한 종류의 기계로 구성되어 있다.

이 Job Shop에서 가공해야할 Job의 형식은 3 가지로서, 각각의 가공순서 및 가공시간은 Table 2 에 요약되어 있으며, 가공시간은 지수분포(exponential distribution)에 따르고, Job은 가공을 위해서 30분간격으로 도착한다고 한다.

Table 1. Types and Numbers of Machines

Machine Group Number	Type of Machine	Number of Machines in Group
1	Casting Units	10
2	Lathes	4
3	Planers	3
4	Drill Presses	4
5	Shapers	12
6	Polishing Machines	3

Table 2. Visitation Sequences and Mean Operation Times for the Three Types of Jobs

Job Type	% of Total Jobs	Machine Visitation Sequence		Mean Operation Time (min)
		Seq.No.	Machine Type	
1	24	1	Casting Unit	125
		2	Planer	
		3	Lathe	
		4	Polishing Machine	
2	44	1	Shaper	105
		2	Drill Press	90
		3	Lathe	65
3	32	1	Casting Unit	235
		2	Shaper	
		3	Drill Press	
		4	Planer	
		5	Polishing Machine	

이 Job shop의 SIMAN 모델링과 이를 FMC 로 변환한 SIMAN 모델링과의 결과를 비교분석한다.

(2) Job shop의 SIMAN 모델

Job shop에 대한 SIMAN의 블록다이어그램 모델(block diagram model)이 Fig. 9에 주어

져 있는데, 이것은 STATION 블록을 사용한 Macro 모델을 이용하였다. 시뮬레이션의 조건이 Fig 10에 요약되어 있으며, 각 Job의 가공순서 및 가공시간이 PARAMETERS 요소에 명시되어 있고 각 기계간의 부품의 이동거리가 DISTANCES 요소에 주어져 있다. 이 모델을 5회에 걸쳐서 1년간[20.5(시간/일) × 25(일/월) × 80%(가동율) × 12(개월) = 4,920(시간)] 시뮬레이션을 실행하였다.

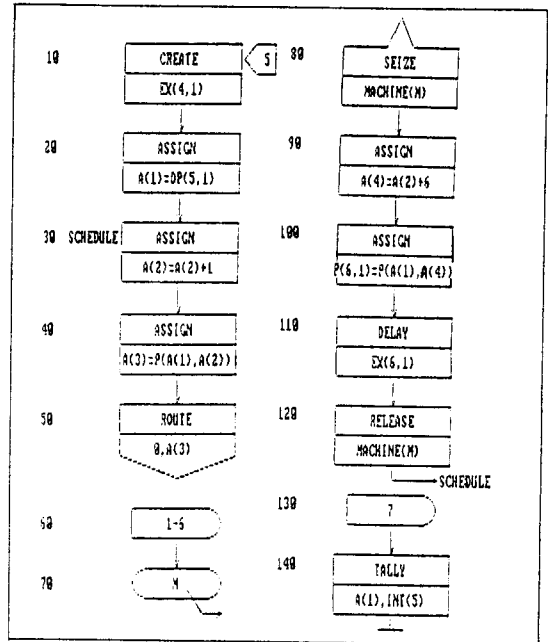


Fig. 9. Block Diagram Model of Job Shop

시뮬레이션의 결과를 분석해 보면, 연간생산량은 Job 1 이 2360개, Job 2 가 4305개, Job 3 이 3151개로 모두 9816개가 생산되었고, 시스템내의 평균체류시간은 Job 1 이 240분, Job 2 가 265분, Job 3 이 597분이며, 기계의 활용도는 Table 3에 나타낸 바와 같이 비교적 낮은 편이다. (결과의 수치는 5회 시뮬레이션결과의 평균값을 나타냄).

```

BEGIN:
PROJECT JOB SHOP, J. S. YANG, 5/4/86;
DISCRETE, 1500, 5, 3, 7;
RESOURCES: 1-5, MACHINE, 10, 4, 3, 4, 12, 3;
TALLIES: 1, TSYS OF JOB1;
          2, TSYS OF JOB2;
          3, TSYS OF JOB3;
DISTANCES: 1, 1-7, 3, 3, 3, 3, 9, 9/
            2, 3, 3, 7, 7, 3, 3, 6/
            3, 3, 6/9, 9/3;
PARAMETERS: 1, 1, 3, 2, 3, 7, 0, 125, 35, 20, 50, 0, 0;
             2, 5, 4, 2, 7, 0, 0, 105, 90, 55, 0, 0, 34;
             3, 1, 5, 4, 3, 3, 7, 275, 250, 50, 30, 25, 0;
             4, 20;
             5, 24, 1, 38, 2, 1, 0, 3;
             6, 0;
DSTAT: 1, NR(1), MC 1 UTIL.;
        2, NR(2), MC 2 UTIL.;
        3, NR(3), MC 3 UTIL.;
        4, NR(4), MC 4 UTIL.;
        5, NR(5), MC 5 UTIL.;
        6, NR(6), MC 6 UTIL.;
        7, NO(1), MC 1 QUEUE;
        8, NO(2), MC 2 QUEUE;
        9, NO(3), MC 3 QUEUE;
        10, NO(4), MC 4 QUEUE;
        11, NO(5), MC 5 QUEUE;
        12, NO(6), MC 6 QUEUE;
REPLICATE, 5, 0, 295200;
END:
    
```

Fig. 10. Experimental Frame for Job Shop

Table 3. Average utilization of Machine Group

Machine Group	1	2	3	4	5	6
Average Utilization (%)	35.3	27.7	20.2	46.5	34.7	24.9

(3) FMC의 설계 및 SIMAN 모델링

Job shop 모델의 각 Job 의 형식별로 GT 셀을 형성하여 Job shop에서 주어진 동일한 조건 및 연간 생산량을 얻기 위해 필요한 각 기계그룹별의 기계대수를 분석해 본 결과, 원래의 Job shop에서 모두 36대의 기계가 소요되었으나 FMC에서는 24대의 기계가 있으며 충분함이 밝혀졌다. 즉 기계그룹 1에서 4대, 기계그룹 2, 3, 6에서 각 1대씩 기계그룹 5에서 5대 합계 12대가 감소될 수 있음이 밝혀졌다. FMC의 설계에 소요되는 셀 (cell) 별 기계대수는 Table 4에 요약한 바와 같다.

FMC의 시스템 모델에 대한 SIMAN의 블록 다이어그램 모델의 일부가 Fig. 11에 주어져 있고, 시스템 모델은 3개의 서브모델로 구성하였다.

FMC의 시뮬레이션 조건은 기계대수를 나타내는 RESOURCES 요소가 변경되었고 나머지는 Job Shop에서 사용한 조건과 유사하며, 5회에 걸쳐

Table 4. Number of Machines in FMC

Machine Type	Number of Machines			Total
	Cell 1	Cell 2	Cell 3	
Casting Unit	2	-	4	6
Lathe	1	2	-	3
Planer	1	-	1	2
Drill Press	-	3	1	4
Shaper	-	3	4	7
Polishing Unit	1	-	1	2
Total	5	8	11	24

서 1년간씩 시뮬레이션을 실행하였다. FMC에서 연간 평균 생산량은 Job 1이 2370개, Job 2가 4312개, Job 3이 3179개로 모두 9861개이며, 시스템내의 체류시간은 Job 1이 348분, Job 2가 309분, Job 3이 812분이며, 각 셀별로 기계의 활용도는 Table 5에 요약하였다.

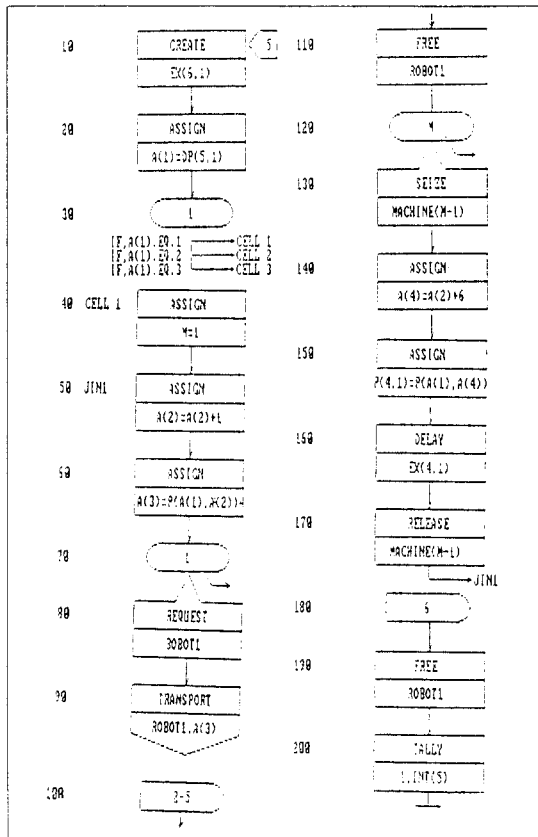


Fig. 11. A Part of Block Diagram Model of FMC

Table 5. Machine Utilization of FMC

Machine Type	Cell 1			Cell 2			Cell 3		
	No-of M/C	TU	AU	No-of M/C	TU	AU	No-of M/C	TU	AU
Casting Unit	2	101.8%	50.9%	-	-	-	4	253.6%	63.4%
Lathe	1	16.2%	16.2%	2	94.8%	47.4%	-	-	-
Planer	1	28%	28%	-	-	-	1	32.6%	32.6%
Drill Press	-	-	-	3	131.7%	43.9%	1	54.2%	54.2%
Shaper	-	-	-	3	151.8%	50.6%	4	270.8%	67.7%
Polishing Unit	1	47.8%	47.8%	-	-	-	1	27%	27%

Remark : TU = Total Utilization, AU = Adjusted Utilization

(4) 결과의 비교분석

Job shop 과 FMC에 대한 시뮬레이션의 결과를 소요기계대수, 연간생산량 및 기계의 활용도의 관점에서 고찰한다.

(ㄱ) 소요기계대수와 생산량

연간 같은 생산량을 생산하는데 소요되는 기계대수는 Table 6에 나타낸 바와 같이 FMC쪽이 12대나 적게 소요된다. 이때 Job shop에서는 평균 9816개, FMC에서는 9861개를 생산하며, 생산효율의 측면에서도 FMC가 효율적이다.

Table 6. Comparison of Number of Machines for Job Shop and FMC

Type	Machine Group						Total
	1	2	3	4	5	6	
Job shop	10	4	3	4	12	3	36
F.M.C.	6	3	2	4	7	2	24

(ㄴ) 기계의 활용도

기계의 활용도에 대한 비교결과가 Fig. 12에 주어지 있는데, FMC쪽이 활용도가 높음을 알 수 있다. Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 활용도가 낮은 기계는 실제 레이아웃트를 할 때, 기계부하분석의 결과를 사용해서 셀간의 조정을 통해서 활용도를 증가시킬 수 있다.

이상의 결과에서 살펴 본 바와 같이, FMC

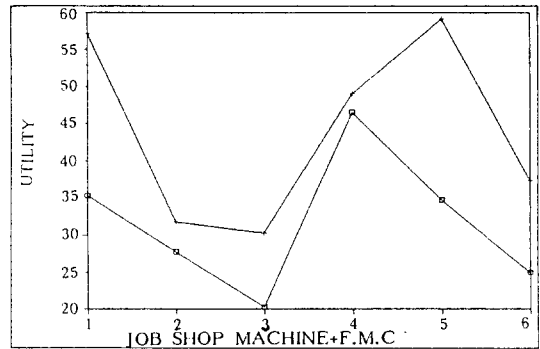


Fig. 12. Machine Utilization for Job shop and FMC

가 다중소량생산에서 생산성 및 유연성의 측면에서 효율적임을 알 수 있다.

5-3. FML의 설계 및 분석

(1) 모델의 설정

3 가지 형식의 제품(P₁, P₂, P₃)을 가공하는 가공라인에 대한 자동화생산시스템을 실제자료를 사용해서 평가한다. 제품의 연간생산량은 P₁이 2,200~2,300대, P₂ 및 P₃가 각각 300~350대씩이며, 연간 작업시간은 4,920시간 [20.5(시간/일) × 300(일/년) × 80%(가동율)]이다.

제품의 혼합은 세가지 경우로서, (1) 경우 1은 P_1 과 P_2 의 동시가공으로 P_1 을 2,300대, P_2 를 350대 생산해야 하고, (2) 경우 2는 P_1 을 2,300대, P_2 를 350대 생산해야 하며, (3) 경우 3은 P_1 만 가공하며, 이때 연간생산량 2,300대를 만족해야 한다.

각 제품에 대한 가공공정 및 표준시간을 분석한 결과, 가공소요시간은 P_1 , P_2 , P_3 가 각각 932(분/개), 1,032(분/개), 1,127(분/개)이다.

이같은 자료를 사용해서 자동화시스템을 설계하고자 한다. 같은 가공라인에서 3가지 제품을 가공해야 하므로 전용 트랜스퍼 머신을 사용할 경우에는 유연성이 없으므로, FMS를 도입하기로 한다. 여기서는 FMS의 구성을 위주로 한 설계 및 분석을 시행한다.

(2) FMS의 시스템 구성

가공물의 공정분석의 결과도 소요기계는 공구매거진(tool magazine), 자동공구교환 장치(ATG) 및 자동팰렛트교환장치(APC)를 갖춘 머시닝센터, 라인보링머신(line boring machine) 시린더리컬 보링머신(cylindrical boring machine) 및 세척설비가 소요되었다.

소요생산량을 충족시킬 수 있는 이론적인 기계대수를 기계부하분석의 자료를 이용하여 계산한 결과를 Table 7에 요약하였다.

작업물반송시스템은 양방향으로 움직일 수 있고, 또 곡선주행을 할 수 있는 카트(cart)를 선정하였고, 수량은 1대이며 이송속도는 10m/min로 설정하였다.

Table 7. Number of Machines for Machine Type

Machine Type	Number of Machines	
	Computed Value	Practical Value
MCT 1	0.94	1
MCT 2	0.94	1
MCT 3	0.94	1
MCT 4	0.94	1
MCT 5	0.94	1
MCT 6	0.74	1
Line Boring M/C	0.18	1
Cylindrical Boring M/C	0.27	1
Washing Machine	1.90	2

(Remark) MCT = Machining Center

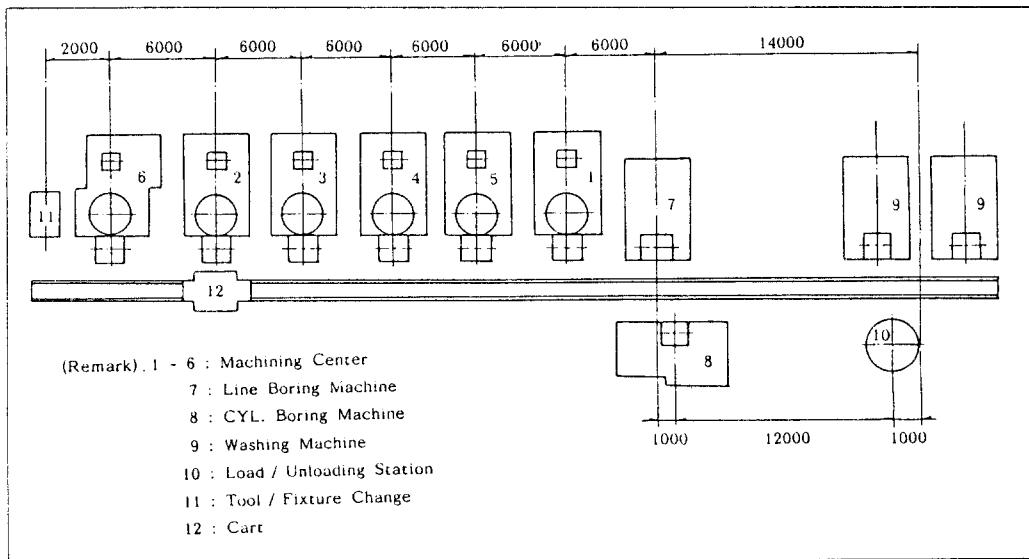


Fig. 13. Proposed FMS Layout

생산대상의 제품수가 3 가지이고, 연간 최대 생산량이 2,650대이므로, 이에 적합한 FMS의 구조적 배치는 FML (Flexible Manufacturing Line)로 설계한다.¹⁵⁾ 여러가지의 설계대안 가운데서 생산량 및 기계활용도의 측면을 고려한 설비배치를 Fig. 13에 도시하였다.

(3) 결과의 분석 및 평가

설계된 FML의 SIMAN 모델을 작성하여 1년간(4,920시간) 시뮬레이션을 실행한 결과를 생산량, 시스템내의 체류시간, 기계의 활용도에 대하여 고찰하였다. 각 기계에서의 완충저장지역은 충분하다고 가정하였다.

제품별 연간생산량에 대한 시뮬레이션 결과가 Table 8에 있는 바와 같이 설계 조건을 충족시킴을 알 수 있고, 이 생산량을 생산 하기위한 가공물의 도착간격은 P_1 이 122분, P_2 및 P_3 각각 825분이면 충분하다.

제품별 시스템내의 체류시간이 Table 9에 주어져 있는데, 이는 이론적으로 산정한 표준시간보다 큰 값을 가지며, 그 이유는 대기시간이 포함되어 있기 때문이다.

Table 8. Annual Production Quantity for Product Type

Product Type	Case # 1	Case # 2	Case # 3
P 1	2,410	2,410	2,412
P 2	357	-	-
P 3	-	356	-

Table 9. Time in System for Product Type (Unit : min)

Product Type	Case # 1	Case # 2	Case # 3
P 1	1,207	1,191	1,032
P 2	1,316	-	-
P 3	-	1,763	-

기계의 활용도가 Table 10에 요약되어 있는데 라인보링머신과 시린더리컬보링머신을 제외하고는 아주 높은 값을 보여 주고 있다. 실제에

는 기계의 고장 및 예방정비등을 고려하면 이 값보다는 낮아짐이 사실이다.

이상의 분석결과에 의하면 설계한 FML 시스템은 설계조건을 충족시킴을 알 수 있고, 시뮬레이션에 의한 설계분석의 방향을 제시하고 있다.

Table 10. Machine Utilization

Machine Type	Machine Utilization (%)		
	Case # 1	Case # 2	Case # 3
Machining Center 1	0.98	0.98	0.98
" 2	0.98	0.98	0.98
" 3	0.98	0.98	0.98
" 4	0.98	0.98	0.98
" 5	0.98	0.98	0.98
" 6	0.77	0.88	-
Line Boring Machine	0.19	0.19	0.16
Cylindrical Boring Machine	0.28	0.28	0.25
Washing Machine	1.99	1.99	1.99

(Remark) Number of Washing Machine is 2.

6. 결 론

다중 소량생산의 자동화생산시스템으로 최근에 도입 활용되고 있는 FMS의 설계분석에 대하여 SIMAN을 사용한 컴퓨터 시뮬레이션 방법을 이용하여 분석 및 평가하였다.

FMS를 자동화된 여러가지의 요소기술로 구성된 토탈시스템의 관점에서 본 특성을 고찰하였고, FMS의 설계 및 운용에 관련되는 문제점을 검토하였으며, NC공작기계의 대수와 설비배치의 관점에서 본 FMS의 구조적 분류를 고찰하였다.

FMS설계시에 중요한 문제인 부품-기계그룹 형성에 대한 새로운 발견적기법을 개발하여 제안하였으며, 이의 소프트웨어를 BASIC 으로써 IBM PC / XT를 사용해서 개발하였다.

제조시스템의 시뮬레이션 모델링시의 문제점을 고찰하고, 이를 해결해서 FMS의 시뮬레이션에 유용한 SIMAN을 사용한 FMS의 시뮬레이

선 모델링과정을 고찰하였다. SIMAN을 이용한 FMS의 설계분석을 기존의 Job shop을 FMC로 변환하는 설계문제와 다품종의 제품을 같은 가공라인에서 가공할 경우에 대한 FMS의 설계문제를 실제자료를 사용하여 적용한 결과를 분석하였다.

본 연구에서는 FMS의 시스템설계의 분석에 대하여 주로 다루었으나, 앞으로는 FMS의 운용기술분야에 대한 계속적인 연구가 필요하다고 사료된다.

참고문헌

1. 人見勝人, "フレキシブル・オートーションと生産システム技術," 시스템과 제어, Vol. 24, No. 3, pp. 136 - 146, 1980
2. Groover, M.P., Automation, Production Systems and Computer-Aided Manufacturing, Prentice-Hall Inc., 1980.
3. 古賀久雄, FMS의設計, 日刊工業新聞社, 1985
4. Pun, L., G. Doumeingts, and A. Bourelly, "The GARI approach to structural design of flexible manufacturing systems," Int. J. prod. Res., Vol.23, No.6, pp. 1197-1215, 1985.
5. Browne, J. and K. Rathmill, "The Use of Simulation as a Design Tool for FMS," Proc. of the 2nd Conf. on FMS, London, U.K., pp. 185-196, 1983.
6. Pegden, C.D., Introduction to SIMAN, System Modeling Corporation, State College, PA, 1985.
7. Pegden, C.D., and I. Ham, "Simulation of Manufacturing Systems Using SIMAN," Annals of CIRP, Vol.31/1, 1982.
8. Pegden, C.D., D.J. Medeiros and I. Ham, "Simulation of Flexible Manufacturing Systems Using SIMAN," Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo, Japan, pp. 775-787. 1984.
9. Kearney & Trecker Corp., Understanding Manufacturing Systems, Vol.1, Milwaukee, Wis., 1976.
10. Hutchinson, G.K., FMS's in the United States, Management Research Center, Univ. of Wisconsin, Milwaukee, 1979.
11. Dupont-Gatelmand, C., "A Survey of Flexible Manufacturing Systems," J. of Manufacturing Systems, Vol.1, No.1, pp1-6, 1982.
12. Eversheim, W. and P. Harrmann, "Recent Trends in Flexible Automated Manufacturing," J. of Manufacturing Systems, Vol.1, No.2, pp.139-147, 1982.
13. Warnecke, H.J., and R. Steinhilper, "Flexible Manufacturing Systems ; new concepts ; EDP-supported planning ; application examples," Proceedings of the 1st International Conference on FMS, Brighton, U.K., pp. 345-356, 1982.
14. Ranky, P., The Design and Operation of FMS, IFS Ltd., 1983.
15. Kusiak, A., "Flexible Manufacturing Systems : A Structural Approach," Int.J. Prod. Res., Vol.23, No.6, pp. 1057-1073, 1985
16. Stecke, K.E., Production Planning Problem for FMS's Ph.D. Dissertation, Purdue Univ, 1977.
17. Stecke, K.E., "Formulation and Solution of Nonlinear Integer Production Planning Problems for FMS's," Management Science, Vol.29, No.3, pp 273-288, 1983.
18. Kusiak, A., "The Part Families Problem in FMS's," Working Paper #06/84, Dept. of I.E., Technical Univ. of Nova Scotia, Nova Scotia, Canada, 1984.
19. Stecke, K.E., and J.J. Solberg, "The Optimal Planning of Computerized Systems ; The CMS Loading Problem," Report No.20 School of I.E., Purdue Univ., W. Lafayette, 1981.
20. Kusiak, A., "Loading Models in FMS's," Proc. of Int. Conf. on Production Research pp. 641-647, 1983.
21. Solberg, J.J., "A Mathematical Model of Computerized Manufacturing systems," Proc. of the 4th International Conf. on Production Research, Tokyo, pp. 1265-1275, 1977.
22. Hildebrant, R.R., "Scheduling FMS's Using Mean Value Analysis," Proc. IEEE Conf. on Decision and Control, pp. 710-706, 1980.
23. Suri, R. and R.R. Hildebrant, "Modelling FMS's Using MVA," J. of Manufacturing Systems, Vol.3, No.1, pp.27-38, 1984.
24. Vinod, B., and J.J. solberg, "The Optimal Design of Flexible Manufacturing Systems," Int. J. Prod. Res., Vol.23, No.6, pp. 1141-1151, 1985.
25. Buzacott, J.A., "The role of inventory banks in flow line production Systems," Int. J. of Production Research, Vol.9, pp. 425-436, 1971.
26. Buzacott, J.A., and Shanthikumar, J.G., "Models for Understanding flexible manufacturing Systems," AIIE Trans., Vol.12, No.4, pp. 339-350, 1980.
27. Dubois, D., "A Mathematical Model of a FMS with Limited In-Process Inventory," European J. of O.R., Vol.14, No.1, pp.66-78, 1983.

28. Bevans, J.P., "First, Choose an FMS Simulator," *American Machinist*, 126(5), pp. 143-145, 1982.
29. Nof, S.Y. et al., "Operational Control of Item Flow in Versatile Manufacturing Systems," *Int. J. of Production Research*, 17(5), pp. 479-489, 1979.
30. Stecke, K.E., and J.J. Solberg, "Loading and Control Policies for a FMS," *Int. J. of Production Research*, 19(5), pp. 641-647, 1983.
31. Purdom, P.B., and T. Palazzo, "The Citroen FMC," *Proc. of the 1st Conf. FMS's*, pp. 151-169, 1982.
32. Schroer, B.J., and J.T. Black, and S.X. Zhang, "Microcomputer Analyzes 2-card Kanban System for 'Just-In Time' Small Batch Production," *Industrial Engineering*, pp. 54-65, June 1984.
33. Mills, R.I., "Computer Simulation - A Feasibility and Planning Tool for FMS," *Proc. of the 2nd Int. Conf. on FMS*, pp. 185-196, 1983.
34. Young, J.F., M.C. Bonney, and J.A.G. Knight, "GRASP - A Design Tool for FMS," *Proc. of the 2nd Int. Conf. on FMS*, pp. 215-228, 1983.
35. Carrie, A.S., and E.Adhami, "Introducing FMS by Simulation," *Proc. of the 2nd Int. Conf. on FMS*, pp. 229-238, 1983.
36. Spur, G., B. Viehweger and B.S. Wieneke, "Problem Oriented Methods for Planning and Optimization of Flexible Manufacturing Systems," *Proc. of the 2nd Int. Conf. on FMS*, pp. 239-250, 1983.
37. Rathmill, K., N. Greenwood, and M. Houshmand, "Computer Simulation of FMS," *Proc. of the 2nd Conf. on FMS's*, pp. 251-280, 1983.
38. Lee, L.C., "A Study of System Characteristics in a manufacturing cell," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.23, No.6, pp. 1101-1114, 1985.
39. Wilhelm, W.E. and H-M Shin, "Effectiveness of alternate operations in flexible manufacturing system," *Int. J. of Prod. Res.*, Vol.23, No.1, pp. 65-79, 1985.
40. Ham, I., et al., "Computer Simulation of Manufacturing Systems under Group Technology Environment for Higher Manufacturing Productivity," *Research Report, Pennsylvania State University*, May 1982.
41. Yao, D.D., and J.A. Buzacott, "Modelling the Performance of Flexible Manufacturing Systems," *International Journal of Production Research*, Vol.23, No.5, pp. 945-959, 1985.
42. Burbidge, J.L., "Production Flow Analysis," *The Production Engineer*, pp.139-152, April 1971.
43. McAuley, J., "Machine Grouping for Efficient Production," *Production Engineer*, pp. 53-57, February 1972.
44. McCormick, W.T., Schweitzer, P.J., and T. White, "Problem Decomposition and Data Reorganization by a Clustering Technique," *Operations Research*, pp. 993-1009, 1972.
45. King, J.R., "Machine-Component Grouping in Production Flow Analysis : An Approach using a Rank Order Clustering Algorithm," *International Journal of Production Research*, Vol.18, No.2, pp. 213-232, 1980.
46. King, J.R., and V. Nakornchai, "Machine-Component Group Formation in Group Technology : Review and Extension," *Int. J. Prod. Res.*, Vol.20, No.2, pp.117-133, 1982.
47. Chan, H.M., and D.A. Milner, "Direct Clustering Algorithm for Group Formation in Cellular Manufacture," *J. of Manufacturing Systems*, Vol.1, No.1, pp.65-74, 1982.
48. Purcheck, G., "Machine-Component group formation : an heuristic method for flexible production cells and flexible manufacturing systems," *Int.J. Prod. Res.*, Vol.23, No.5, pp. 911-943, 1985.
49. Ham, I., K. Hitomi and T. Yoshida, *Group Technology*, Kluwer-Nijhoff Publishing, 1985.
50. Hitomi, K., (ed.), *Production Management Systems by Group Technology* (Japanese), Tokyo Daily Technical Newspaper Co., 1981.
51. Schriber, T., *Simulation Using GPSS*, John Wiley, 1974.