

다구치방법과 시뮬레이션을 이용한 통합된 자동생산시스템의 최적운영방안의 결정*

임준복** · 김길수*** · 성기석****

Determination of the Optimal Configuration of Operating Policies in an Integrated-Automated Manufacturing System Using the Taguchi Method and Simulation Experiments

Joon-Mook Lim · Kil-Soo Kim · Ki-Seok Sung

〈Abstract〉

In this paper, a method to determine the optimal configuration of operating policies in an integrated-automated manufacturing system using the Taguchi method and computer simulation experiments is presented. An integrated-automated manufacturing system called direct-input-output manufacturing system(DIOMS) is described. We only consider the operational aspect of the DIOMS. Four operating policies including input sequencing control, dispatching rule for the storage/retrieval(S/R) machine, machine center-based part type selection rule, and storage assignment policy are treated as design factors. The number of machine centers, the number of part types, demand rate, processing time and the rate of each part type, vertical and horizontal speed of the S/R machine, and the size of a local buffer in the machine centers are considered as noise factors in generating various manufacturing system environment. For the performance characteristics, mean flow time and throughput are adopted. A robust design experiment with inner and outer orthogonal arrays are conducted by computer simulation, and an optimal configuration of operating policies is presented which consists of a combination of the level of each design factor. The validity of the optimal configurations is investigated by comparing their signal-to-noise ratios with those obtained with full factorial designs.

1. 서 론

최근 들어 기업체들이 인력부족과 임금상승에 따른 경영난을 극복하기 위하여 도입하고 있는 자동화 설비는 고객에게 다양한 제품을 우수한 품질로 제공할 수 있게 하며, 원가를 낮

춤으로써 고임금의 벽을 극복할 수 있게 하여 준다. 일반적으로 자동화(automation)는 제품의 다양화, 단납기화에 따라 유연성과 기동성, 생산효율을 동시에 추구하는 유연자동화(flexible automation)의 의미와, 공장간 혹은 설비간 정보흐름의 원활화를 추구하는 커뮤니케이션 네트워크(communication

* 본 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 공모과제 연구비에 의해서 연구되었음.

** 대전산업대학교 산업공학과

*** 한국과학기술원 산업공학과

**** 강릉대학교 산업공학과

network)의 기능을 동시에 만족시키는 것으로 정의되고 있다.

이에 맞춰 제품 가공업체에서는 자동생산 수치제어시스템(numerical control system)의 도입을 서두르고 있다. 또한 저장 및 불출의 자동화를 위해서 자동창고(AS/RS:automated storage/retrieval system)의 도입도 추진되고 있으며 각 가공시스템간의 원활한 물품의 전달 및 회수를 위한 자동 운반기구(AGV:automatic guided vehicle)가 사용되고 있다.

자동화의 정의에서 의미하는 바와 같이 생산시스템 전체의 효율을 높이기 위해서는 도입된 개개의 자동화시스템만의 최적운영으로는 이루어질 수 없으며, 수치제어 가공시스템, 자동 운반기구 및 자동창고간의 관계를 고려한 원활한 통제 시스템의 구축 없이는 이루어질 수 없다.

그러나 각기 독립적으로 도입된 시스템들이 서로 원활히 연결되어 운영될 수 있도록 통제하기란 매우 어려운 문제이며, 고가의 자동화시스템이 도입되었음에도 불구하고 각 시스템들간의 연결성 부족으로 인한 생산성 저하 현상을 볼 수 있다.

최근 들어, 가공시스템의 내부에 소형의 자동창고 시스템을 설치하고 그 양쪽(때로는 한쪽)에 나란히 머시닝센터(machining center)들을 배치시켜서, 자동창고가 원재료(raw material)와 재공품(WIP:work-in-process)을 저장하는 역할을 맡게 하고, 각 머시닝센터 바로 앞에 위치한 자동창고의 랙 오프닝(rack opening)은 머시닝센터 가공물의 적재/하역(P/D:pickup/deposit)을 위한 포트(port)로 사용되며, 스택커 크레인(stacker crane)

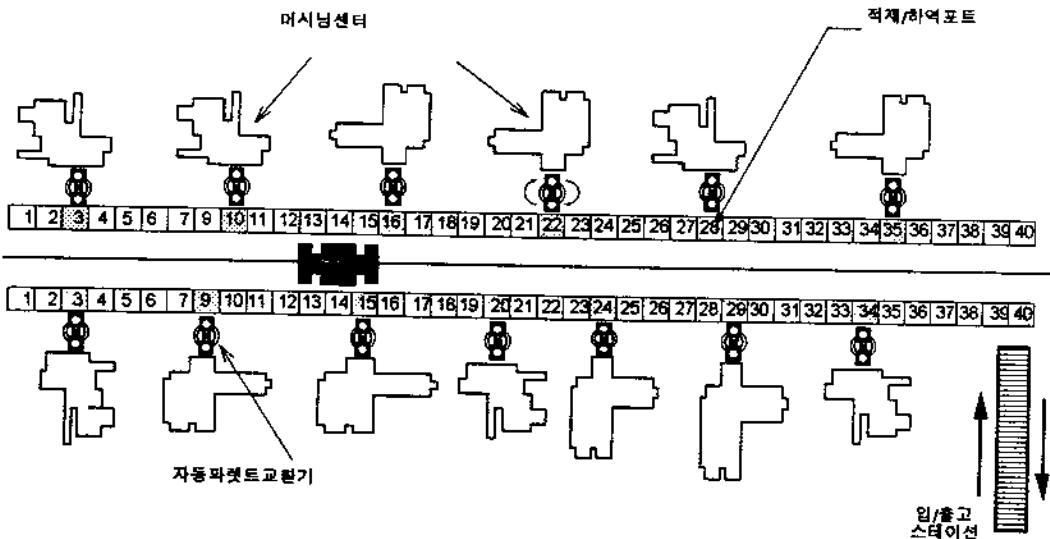
은 자동창고 내부에서 물품의 불출과 저장은 물론 각 머시닝센터에 가공물의 적재/하역이 가능하도록 적재/하역 포트에 가공물을 운반해주는 역할을 맡게 하는 통합된 가공시스템이 도입되고 있다.

이렇게 머시닝센터들과 자체취급시스템(material handling system)을 통합하여 운영함으로써, 공간의 효율적 활용, 실시간 내의 재고 파악, 더 나은 생산조건외의 컨트롤 및 다양한 공정 변화에도 적절히 대응할 수 있는 유연성을 확보 할 수 있게 된다. <그림 1>은 이러한 시스템의 개략적인 상황을 보여주고 있다.

이러한 시스템은 'DIO가공시스템(direct-input-output manufacturing system)'이라는 이름으로 일본, 스웨덴 등에서는 물론 우리나라에서도 D중공업, H정공등에서 설치하여 운영하고 있다(Chow(1986), Kusiak(1985), Lim(1994)).

DIO가공시스템을 설치 운영하는데 일어날 수 있는 문제로는 크게 나누어서, 시스템의 설계와 관련된 문제(기계의 설비 배치문제, 운반단위크기 결정문제, 자동창고의 크기결정문제 등)와 시스템의 운영과 관련된 문제(가공물 투입순서 결정 문제, 가공물 저장위치 결정문제, 스택커크레인의 작업배정에 관한 문제, 자동창고로 부터의 가공물선택에 관한 문제 등)로 나눌 수 있다.

DIO가공시스템에서의 최적설계와 시스템운영 조건을 찾아내기 위해서는, 설계문제와 운영에 관련된 문제가 서로 깊은



<그림 1> DIO 가공시스템

연관성을 가지므로 설계와 운영에 관한 문제들을 한꺼번에 다루어야 하겠지만, 이것을 동시에 고려하는 것은 매우 복잡하여 현실적으로 불가능하다. 지금까지 다루어진 많은 시스템의 문제에서와 마찬가지로 DIO가공시스템의 문제도 단계적 절차를 따르게 되는데, 먼저 주어진 환경 하에서 시스템 설계문제(기계배치, 운반단위크기 및 자동창고의 크기결정 등)를 해결하게 되고 최적의 설계에 의해서 얻어진 시스템의 조건 하에서 최적의 운영 조건들을 찾아내게 된다.

시스템의 설계문제가 적절히 해결되고 나면 시스템의 효율은 운영정책들을 주어진 환경에 얼마나 알맞게 잘 결정하느냐에 따라 크게 의존하게 된다. 다시 말하면, 주어진 설계조건 하에서, 현 시스템이 최대의 운영효율을 발휘할 수 있도록 최적의 운영 정책을 결정하여 줄으로써 시스템의 생산성을 극대화시킬 수 있는 것이다.

그러나 DIO가공시스템의 운영을 맡은 관리자가 시스템의 설계 조건만 주어진 상황 하에서, 시스템을 직접 가동시켜보지도 않고 그 시스템에 알맞은 운영 정책을 결정하기란 그리 쉬운 일이 아니다. 예를 들어, 스택커크레인의 작업배정규칙(dispatching rule)으로 사용될 수 있는 것으로 지금까지 여러 문헌에서 제시된 방법들을 살펴보면, 선입선출법(FCFS: first-come-first-served rule), 최단거리우선법(STT: shortest-travel-time rule), 최단납기법(EDD: earliest-due-date rule) 등 수십여 가지에 이르게 된다(Panwalker 등(1977)). 이 규칙들 중 어떤 규칙이 DIO가공시스템에 가장 효과적인가를 알아내기 위해서는 모든 경우에 대하여 실험을 해보아야 한다. 그 뿐만 아니라 시스템에 영향을 줄 수 있는 운영정책은 스택커크레인의 작업배정규칙 이외에, 여러가지의 저장방식 및 DIO가공시스템에의 가공물 투입 순서 등의 정책요소가 있고 그들 상호간에 어떤 연관성이 있을지도 모르기 때문에 작업배정규칙 만을 고려한 최적 운영방법이 실제로 DIO가공시스템을 운영하는데 최적의 효과를 줄 수 있다고 보기 어렵다. 결국 최적의 운영정책 조합을 찾아내기 위해서는 운영정책들 간의 모든 조합에 대하여 실험을 수행해야 하는데, 이는 엄청난 실험횟수와 시간을 요구하게 마련이다. 게다가, 각 운영정책의 성능은 시스템 환경의 변화에 영향을 받을 수 있으므로 현실적으로 보다 의미있는 결과를 얻기 위해서는 시스템의 환경(예를 들어, 가공물의 종류, 수, 가공시간 등의 요소)을 변화시켜 가면서 운영정책이 시스템에 미치는 효과들을 측정하는 것이 바람직하다. 한 예로, 우리가 고려하고자 하는 운영정책이 4가지이고 각 운영정책마다 4가지의 규칙을 적용할 수 있다고 하자. 또한 시스템의 수행

도에 영향을 미칠 수 있는 시스템 환경요소가 6가지이고 그 각각이 취할 수 있는 값이 두 가지라고 하자. 운영정책, 시스템의 환경요소 및 이들간의 조합이 시스템에 미치는 영향을 모두 알아보기 위한 일반적인 실험계획(full factorial design)에 의하면 $4^4 \times 2^6 = 16,384$ 회의 실험과 추가적인 반복실험이 요구된다. 실로 엄청난 시간과 비용이 요구된다고 할 수 있다. 여기서 우리는 효과적으로 DIO가공시스템의 운영정책을 결정하기 위해 다음과 같은 문제점을 해결 할 수 있어야 함을 알 수 있다.

- ① 실험횟수를 획기적으로 줄일 수 있어야 한다.
- ② 실험횟수를 최대한 줄이면서도 각 요소가 시스템의 수행도에 미치는 영향을 충분히 알아낼 수 있는 실험계획이 이루어져야 한다.
- ③ 실험결과로부터 결정된 최적의 정책 조합은, 시스템의 환경이 다소 변화를 하더라도 시스템에 미치는 영향이 적어서 어떠한 DIO가공시스템에서도 사용될 수 있도록 로버스트(robust)해야 한다.

현재까지 국내·외의 연구에서는 개별적인 시스템에 대한 최적의 정책결정에 관해서는 다루어져 왔으나 통합된 시스템에서 시스템의 특성을 종합적으로 고려한 운영정책의 개발은 이루어지지 않고 있다(Lim(1994)).

본 연구에서는 DIO가공시스템을 대상으로 어떠한 운영정책들이 사용될 수 있는가를 기존의 연구결과들을 대상으로 조사, 분석하여 개별적인 정책으로서가 아닌 통합된 시스템 전체에서의 최적 운영정책의 조합을 제시하고자 한다. 이렇게 통합된 시스템 전체에서의 최적 운영정책을 결정하는 방법으로 기존에는 일반적인 실험계획(full factorial design)을 사용해 왔으나 너무나 많은 실험 횟수와 비용으로 인해 실효를 거둘 수 없었다. 최근 들어 Mayer와 Benjamin(1992)은 생산시스템의 설계에 다구치 방법을 사용함으로써 효과적으로 설계변수를 결정할 수 있다는 방법론을 제시하고 있다. 그러나 구체적인 통합된 생산시스템에서의 적용에 관해서는 언급하고 있지 못하다. Lim 등(1995)은 DIO가공시스템의 최적의 운영정책을 결정하기 위해서 컴퓨터 시뮬레이션과 다구치방법을 적용하고 있으나 다음과 같은 미흡한 점이 있다. ① 다구치방법을 적용하는 세부적인 절차의 제시가 없다. ② 1회의 시뮬레이션 결과만을 가지고 분석에 적용하고 있어서 점정의 유의성이 부족하다. ③ 다구치방법의 중요한 요소인 확인실험이 없다. 이에 본 연구에서는 Mayer와 Benjamin(1992)의 방법론을 토대로 하고 Lim 등(1995)의 미흡한 점을 보완하여 DIO가공시스템에서의 운영정책들을 특성에 따라 세분하고 컴퓨터 시뮬레이션과

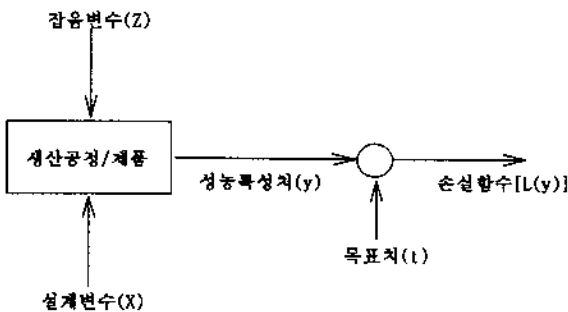
다구치 방법이 주는 효과들(Phadke(1989), Shoemaker(1991))을 활용하여 최적운영정책을 보다 효율적으로 결정 할 수 있는 방안을 제시하고자 한다.

제2장에서는 다구치방법의 기본원리와 변수설계 개념과 절차를 설명하고, 3장에서는 DIO가공시스템의 운영정책에 사용될 수 있는 규칙들을 분석한다. 제4장에서는 다구치방법의 적용절차를 제시하고 제5장에서는 시뮬레이션을 수행하기 위한 DIO가공시스템의 모델링에 대해서 다룬다. 제6장에서는 다구치 방법의 절차에 따라 실험계획과 분석을 행하며 마지막으로 제7장에 결론을 제시 하였다.

2. 다구치 방법

2.1 다구치 방법의 기본원리

이 절에서는 다구치 방법에 대하여 간단히 설명한다. 다구치 방법에 대한 자세한 사항은 염봉진등(1990, 1993)을 참고하기 바란다. 생산공정 또는 제품의 성능특성은 다양한 원인에 의해 변하기 마련이다. 이러한 성능변동의 원인을 잡음이라 한다. 다구치 방법은 잡음을 제거하거나 통제하는 대신에 잡음을 있는 그대로 방치한 상태에서 성능특성의 산포가 잡음에 둔감하도록 생산공정이나 제품을 설계하는 것으로 변수설계(파라미터 설계) 또는 로버스트 설계라고도 한다. 변수설계 문제를 그림으로 표현하면 <그림 2>와 같다(Phadke(1989)).



<그림 2> 변수 설계 문제

여기서, 생산공정의 성능특성치(y)는 잡음변수(Z)와 설계변수(X)에 의해 결정된다. 그리고 잡음변수의 영향으로 성능특성치가 목표치(t)로부터 벗어남으로써 손실이 발생한다. 변수설계의 기본원리는 성능특성치와 그 목표치와의 차이에 의해 발

생하는 기대손실이 최소가 되도록 설계변수(X)의 값을 결정하는 것이다.

일반적으로 성능특성치는 가장 바람직한 값인 이상치 또는 목표치를 가지는 데 다구치는 도장막의 두께와 같이 특정한 목표치가 있어 어느 방향으로의 산포도 바람직하지 않은 특성인 망목특성, '평균체류시간'이나 마모량과 같이 작을수록 좋은 특성인 망소특성, '생산율'이나 접합강도처럼 클 수록 좋은 특성인 망대특성으로 특성치를 구분하고 있다.

생산공정의 성능특성은 잡음의 영향으로 산포하는데, 다구치는 이러한 성능특성의 산포를 손실의 개념을 도입하여 정량화 하였다. 일반적으로 손실함수의 정확한 형태는 알려져 있지 않지만, 다구치는 규격에 맞는 특성만 만들면 된다는 사고방식을 부정하고 특성치의 값이 목표치로 부터 편차가 크면 클수록 손실이 커지며 목표치와 일치할 때 손실은 최소가 된다는 가정 하에 이차식으로 근사화한 손실함수를 제안하고 있다. 예를 들면 y가 망목특성의 경우에 이차손실함수는 $L(y) = k(y - t)^2$ 으로 정의된다. 여기서 k는 어떤 y의 값에 대하여 그에 대응하는 L(y)의 값이 알려져 있으면 구할 수 있는 상수이다. 마찬가지로 망소특성과 망대특성의 경우에 이차손실함수는 각각 $L(y) = ky^2$, $L(y) = ky^2$ 으로 주어진다. 그런데 L(y)는 특정한 시점에서의 y에 대한 값이므로 생산공정이 운영되는 기간동안 y가 목표치로 부터 산포함으로써 야기되는 손실의 평균인 기대손실을 고려하는 것이다.

다구치(1991)는 이와 같은 기대손실을 평가하기 위해 SN비(신호대 잡음비)라는 성능척도를 사용하는데 이를 구하기 위한 실험의 형태와 SN비에 대하여 간단히 살펴보자. 설계나 개선을 목적으로 하는 경우에는 많은 변수를 다루게 된다. 다구치는 이러한 경우에 다원배치를 이용하지 않고 대부분의 경우 직교배열을 이용하여 변수를 배치할 것을 추천하고 있다. 직교배열에서는 변수수준의 모든 조합이 아니라 직교배열로 결정된 특정조합을 대상으로 실험을 수행하는 것이 특징이다. 다구치는 변수설계를 위하여 설계변수를 내측배열에, 잡음변수를 외측배열에 배치하여 설계변수와 각 수준조합(실험점)에서 SN비를 구한다. <그림 3>은 설계변수 A, B, C가 각각 2수준, 잡음변수 P, Q가 2수준일 때 직교배열을 이용한 실험계획의 예이다.

여기서 y_{ij} 는 설계변수들의 i번째 수준조합(실험점), 잡음변수의 j번째 실험조건(test condition)에서 얻은 성능특성치를 나타낸다. 예를 들면 y_{22} 는 설계변수 A는 1수준, B는 2수준, C는 2수준이고 잡음변수 P는 1수준, Q는 2수준에서 실험을 수행

		설계변수		외측배열 ↓				P Q	잡음 변수
				1	1	2	2		
내측배열 →	A	B	C	1	2	1	2	SN ₁ SN ₂ SN ₃ SN ₄	
	1	1	1	y_{ij} ($i, j=1..4$)					
	1	2	2						
	2	1	2						
2	2	1							

〈그림 3〉 변수설계를 위한 실험계획 <L(2⁹) × 2²>

하여 얻은 결과를 나타내는 것이다.

망소, 망대, 망목특성의 경우에 SN비는 각각 다음과 같다.

① 망소특성의 경우,

$$SN_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}^2 \right] \quad (1)$$

여기서, n은 한 실험점에서의 y의 반복수이다.

② 망대특성의 경우

$$SN_i = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \frac{1}{y_{ij}} \right] \quad (2)$$

③ 망목특성의 경우

$$SN_i = 10 \log \left[\frac{\frac{1}{n} (S_{mi} - V_i)}{V_i} \right] \quad (3)$$

여기서, $S_{mi} = \overline{ny_i}$, $\overline{y_i} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n y_{ij}$, $V_i = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \overline{y_i})^2$ 이다.

2.2 변수설계 절차

지금까지 다구치 방법의 기본원리 및 성능척도에 대하여 간단히 살펴보았는데 변수설계를 위한 절차는 망소 또는 망대특성의 경우와 망목특성의 경우로 구분하여 나타낼 수 있다. 절차의 세부적인 내용은 다구치(1991), 염봉진등(1990, 1993)을 참고하기 바란다.

3. DIO가공시스템에서의 운영정책

본 연구에서 대상으로 하고 있는 DIO가공시스템의 운영방법을 개략적으로 설명하면 다음과 같다(〈그림 1〉 참조). 이 시스템은 가공물을 장착한 팔레트(pallet)를 저장할 수 있는 랙(rack)과 한대의 스택크레인으로 구성된 소형자동창고가 있고, 그 양쪽 또는 한쪽에 머시닝센터들을 배치하여 운영되고 있다. 각 머시닝센터들은 자동창고의 가장 밑에 위치한 1층의 랙오픈링들 중 하나를 각각의 적재/하역 포트로 사용한다. 가공 원자재는 팔레트에 올려져서 외부 창고 또는 대형 자동창고로부터 DIO가공시스템의 입/출고 스테이션을 통해서 투입되게 되면 DIO가공시스템 내부에 있는 스택크레인에 의해서 해당 가공 머시닝센터의 적재/하역 포트로 옮겨지게 되고, 적재/하역 포트에 들어온 가공물을 얹은 팔레트는 자동팔레트교환기(APC:automatic pallet changer)에 의해서 머시닝센터에 투입되게 된다. 지정된 가공이 끝나고 나면 팔레트는 다시 자동팔레트교환기에 의해서 적재/하역 포트로 나오게 되고 다음 가공 머시닝센터로의 운반을 위해서 스택크레인을 기다리게 된다. 스택크레인이 도착하게 되면 팔레트는 다음 머시닝센터로의 운반이 가능하게 되는데, 만약 그 머시닝센터의 적재/하역 포트에 다른 팔레트가 놓여져 있을 경우에는 팔레트를 적재/하역 포트로 운반하지 못하고 자동창고의 빈 랙오픈링(rack opening)에 임시로 저장하게 되고, 다음에 적재/하역 포트가 빈 상태로 되었을 때 운반되게 된다. 가공물이 주어진 일련의 가공을 모두 마치게 되면 DIO가공시스템의 입/출고 스테이션을 통해서 시스템 외부로 나가게 된다.

이러한 가공시스템을 설치 운영하는데 일어날 수 있는 문제를 요약하면 〈표 1〉과 같다.

〈표 1〉 DIO가공시스템과 관련된 문제

관련항목	시스템의 설계	시스템의 운영
문제	(1) 기계의 설비배치 (2) 운반단위크기(unit load size) 결정 (3) 자동창고의 크기 결정	(1) DIO가공시스템으로의 가공물 투입순서 결정 (2) 자동창고내의 가공물 저장위치 결정 (3) 스택크레인의 작업배정 (4) 자동창고로부터의 가공물 선택

DIO가공시스템의 설계가 완료되면, DIO가공시스템의 효율

은 시스템의 효과적 운영정책에 의해 결정된다. 본 연구에서는 최적의 운영정책 조합을 결정하기 위해서, 시스템 운영정책을 <표 1>에서 제시된 것과 같이 네 가지로 분류한다. 그에 따른 각각의 문제에 대해서 기존의 연구결과로부터 적용이 가능한 규칙들을 설명하면 다음과 같다.

3.1 DIO가공시스템으로의 가공물 투입순서 결정문제

DIO가공시스템에서 각 머시닝센터의 부하는 투입되는 가공물의 순서에 크게 영향을 받게 된다. 따라서 주어진 여러가지 종류의 가공물들을 적절히 배합하여 순서를 결정하고 그 순서에 따라서 DIO시스템으로 투입시킴으로써 각 머시닝센터에 걸리는 부하를 평준화시킬 수 있게 된다. 만약 각 머시닝센터의 부하가 균형을 이루지 못하게 되면 몇몇 머시닝센터에서의 과부하로 인해서 블로킹(blocking) 현상이 발생하게 되고 시스템의 생산성은 크게 저하되게 된다(Witrock(1985), Monden(1983)). 기존의 연구결과로부터 DIO가공시스템의 가공물 투입순서 결정에 적용이 가능한 규칙들을 살펴보면 다음과 같다.

(1) 생산평준화법(production smoothing method)

이 방법은 가공품의 수량만을 고려한 평준화를 추구한다. 이 방법의 목표는 각 가공품별로 투입되는 수량에 대한 비율이 일정하도록 유지하는 것이다. 이 방법은 도요다의 생산방식에 기초한 방법으로 목표추적방법(goal chasing method)이라고도 불리운다(Monden(1983)).

(2) 부하균형법(load balancing method)

이 방법은 각 머시닝센터에서의 작업부하의 균형을 추구한다. 전체 가공품 혼합에 대해서 동시에 생산을 수행할 수 있는 제품들의 최소가능집합을 최소부품집합(MPS:minimal part set)이라 하자. 예를들면, 제품 혼합이 A가 3000개, B가 2000개, C가 1000개로 주어져 있다면, 최소부품집합은 (3,2,1)이 된다. 부하균형을 유지하기 위한 문제를 해결하기 위해서는 전체제품에 대한 투입순서를 결정하는 문제를 해결해야 하지만 최소부품집합에 있는 제품들만의 순서를 고려해서 결정하고 주기적, 반복적으로 제품을 투입함으로써 그에 상응하는 결과를 얻게 된다. 부하균형법의 자세한 절차는 Witrock(1985)를 참고하기 바란다.

(3) 임의순서법(random sequence method)

이 방법은 남아있는 작업물 중에서 임의의 순서에 따라 한 작업물씩 선택해서 투입시키는 방법이다.

3.2 자동창고내의 가공물 저장위치 결정문제

DIO가공시스템에서 가공물이 자동창고에 저장되는 경우는 다음 가공에 해당되는 머시닝센터가 작업중이고 적재/하역(P/D) 포트가 차 있어서 가공물이 직접 머시닝센터로 옮겨가지 못하는 경우이다. 이럴 경우 스택크레인은 자동창고의 빈 곳을 찾아서 임시로 가공물을 보관하게 되는데, 그 때 여러 곳의 빈 곳 중에서 어디에 저장할 것인가의 문제가 발생한다. 본 논문에서는 다음의 세가지 방법을 고려한다.

(1) 최근위치저장방식(closest open location policy)

작업물이 운반될 목적지는 고려하지 않고 비어있는 랙오프닝 중에서 현재의 위치로부터 가장 가까운 위치에 저장한다(Hausman등(1976)).

(2) 지정위치저장방식(dedicated location policy)

이 방식은 운반될 작업물의 목적지 앞에 위치한 지정된 랙오프닝의 빈 곳에 저장한다(Tanse과 Kiran(1988)).

(3) 임의위치저장방식(random location policy)

이 방식은 랙의 빈 랙오프닝 중에서 거리나 다음 목적지를 고려함이 없이 임의의 위치에 저장하는 방식이다.

3.3 스택크레인의 작업배정(dispatching)에 관한 문제

DIO가공시스템에서 가장 중요한 역할을 담당하고 있는 시스템 요소가 스택크레인이다. 스택크레인은 가공물의 운반은 물론 저장/불출의 역할을 담당하는데 스택크레인의 성능이 시스템 전체의 성능을 좌우한다고 해도 과언이 아니다. 결국 스택크레인의 운영스케줄을 잘 결정해 줌으로써 DIO시스템의 효율을 극대화시킬 수 있게 된다. 지금까지 여러가지 종류의 가공시스템에서 자동운반기구의 스케줄링에 관한 규칙들이 많이 제시되어 있으나 아직까지 DIO가공시스템에 직접적으로 연결시킨 규칙은 알려져 있지 않다. 기존에 알려진 방법 중에서 일반적으로 수행도가 좋은 것으로 알려져 있으면서 DIO가공시스템에 적용이 가능한 세가지 방법을 설명하면

다음과 같다.

(1) 선입선출법(FCFS: first-come-first-served method)

이 방법은 가장 전통적인 방법이며 가장 널리 사용되는 방법이기도 하다. 먼저 들어온 작업물이 스택크레인에 의해서 먼저 운반되게 된다.

(2) 수정최단거리법(MSTT:modified-shortest-travel-time method)

이 방법은 전통적인 최단거리법(Egbelu와 Tanchoco(1984))을 수정한 방법이다. 최단거리법을 근거로 하고 있으며 스택크레인의 공차(空車)운행시간의 비율을 최소화하는 경향을 가진다. 최단거리법에서는 스택크레인이 유휴하게 되었을 경우 스택크레인의 현위치로부터 거리가 가장 가까운 머시닝센터의 적재/하역 포트에 이동하도록 하는 반면에, 수정최단거리법에서는 작업물까지의 이동시간뿐만 아니라 그 작업물의 목적지까지의 운반시간도 모두 고려하게 된다(Han(1989)).

(3) 최대유의운반법(MSM:most-significant-move method)

이 방법에서 추구하는 목표는 머시닝센터에서의 블로킹(blocking) 및 스타빙(starving)의 가능성을 감소시키는데 있다(Han과 McGinnis(1989)). 일반적으로 각 머시닝센터는 유한개의 입/출력버퍼를 가지게 되므로 블로킹이나 스타빙에 의해서 유휴시간을 발생시킨다. 블로킹을 피하기 위해서는, 머시닝센터의 출력버퍼가 이미 꽂 차있을 경우 머시닝센터가 현재의 작업물의 작업을 마치고 출력버퍼에 내려놓기 전에 스택크레인은 출력버퍼에 있는 기존의 작업물을 제거해 주어야한다. 같은 맥락에서 스타빙을 피하기 위해서는 입력버퍼에 작업물이 남아있지 않은 머시닝센터에게 현재 가공중인 작업물의 작업이 끝나기 전에 공급해 주어야 한다.

3.4 자동창고로부터의 가공물선택에 관한 문제

DIO가공시스템에 내장된 자동창고로부터 가공물을 선택하게 되는 경우는, 머시닝센터가 주어진 가공작업을 마치고 유휴한 상태가 되었을 때 자동창고에서 해당 머시닝센터에서의 작업을 기다리는 작업물들 중 어떤 종류의 작업물을 선택하느냐의 문제이다. 이런 형태의 문제는 일반적인 Job shop형태에서 작업물의 스케줄링 문제와 동일하다. 작업물의 효율적 스

케줄링을 통하여 작업물이 시스템내에서 체류하는 평균적인 시간을 줄일 수 있고 나아가서 시스템의 전체적인 효율을 높일 수 있게 된다(Panwalker과 Iskander(1977)).

(1) 선입선출규칙(FCFS: first-come-first-served rule)

먼저 들어온 작업물을 먼저 선택하여 가공한다.

(2) 최소공정시간규칙(SPT: shortest-processing-time rule)

가공시간이 작은 작업물에 우선순위를 준다.

(3) 최단납기법(EDD: earliest-due-date rule)

여유시간이 가장작은 작업물에 우선순위를 준다.

4. DIO가공시스템에서의 다구치방법의 적용절차

앞에서 언급한 바와 같이 각각의 운영 정책에 따라 DIO가공시스템의 최적의 운영정책조합을 찾아내기 위한 방법론으로 시뮬레이션과 다구치 방법을 활용하고자 한다. 시뮬레이션과 다구치 방법의 적용절차를 단계별로 설명하면 다음과 같다(다구치(1991), 염봉진등(1990, 1993), Phadke(1989), Shoemaker 등(1991), Mayer와 Benjamin(1992), Pritsker(1986)).

단계 1: 운영정책의 우열을 평가하기 위한 성능기준을 결정한다. 이 때, 가공시스템의 실제환경, 설계 상의 특징, 관리자의 기호, 분석의 용이성 등 여러가지 요인을 고려하여 보다 현실적이고 의미있는 성능기준을 선정할 수 있도록 한다. 본 논문에서는 생산율(throughput)과 평균체류시간(mean flow time)을 고려한다.

단계 2: 운영정책을 구성하는 개별적인 요소를 선정한다. 앞에서 언급한 ① 가공물 투입순서, ② 저장위치, ③ 스택크레인의 작업배정, ④ 가공물 선택 등을 고려한다.

단계 3: 운영정책의 성능을 평가하기 위한 DIO가공시스템을 설정한다. 이는 가공시스템의 설계요소 및 환경요소의 구체적인 값에 의해서 규정된다. 설계요소로는 기계의 수와 배치 형태, 스택크레인의 속도, 적재 및 운반 단위, 자동창고의 크기, 버퍼의 크기 등을 들 수 있으며, 가공시스템이 구동하게 되는 환경적인 요소로는 가공물 수요, 가공물 종류와 각각

의 갯수 등을 생각할 수 있다. 만약, 가공시스템의 설계가 이루어진 상황이라면 설계요소의 값은 결정된 상태이므로 환경적인 요소의 다양한 조건 하에서 각 운영정책의 성능을 평가하게 된다.

단계 4: 운영요소, 설계요소, 환경요소 등의 구체적인 값을 결정한다. 앞에서 지정한 바대로, 주어진 상황에 부합될 수 있도록 이를 몇가지의 고정된 값으로 정할 것인가 아니면 랜덤 샘플링을 통해 조건을 만들 것인가를 결정한다.

단계 5: 연관성이 깊은 요소들의 교호작용 효과를 분석할 수 있는 실험계획을 선택한다. 단, 기존의 실험계획 중 그러한 것이 존재하지 않을 경우에는 새로운 실험계획을 개발하도록 한다.

단계 6: 시뮬레이션 코드를 개발하여 계획된 실험을 수행하고 데이터를 수집한다.

단계 7: 개별적인 운영요소가 시스템 변화에 따라 어떤 행태를 보이는가를 분석한다. 이를 통해서 가공시스템의 설계나 구동환경이 다소 바뀌더라도 일부 운영정책을 수정함으로써 그 변화에 유연하게 대처할 수 있을 것이다.

단계 8: 환경적 요소의 변화에도 일관된 성능을 보장할 수 있는 최적 운영정책을 수립한다.

단계 9: 확인실험을 통하여 최적 운영방안과 여타 다른 방

안의 성능을 비교한다.

앞에서 설명한 DIO가공시스템에서 다구치방법을 활용하여 최적운영방안의 결정을 위한 절차를 간략히 요약하면 <그림 4>와 같다.

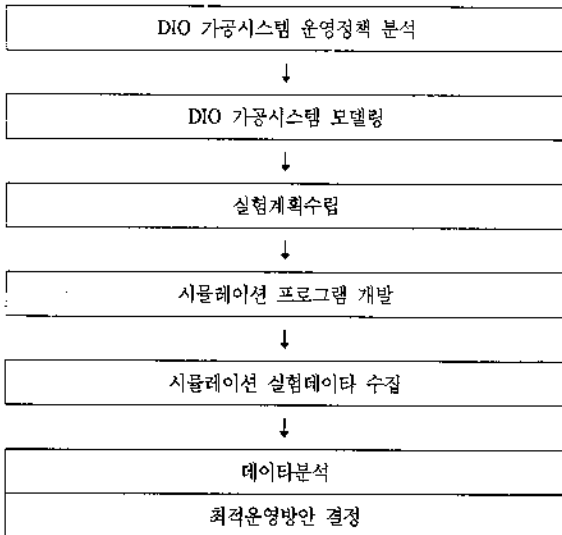
5. 시뮬레이션을 위한 DIO가공시스템 모델링

본 논문에서 고려하고 있는 시스템의 모형을 개략적으로 나타내면 <그림 5>와 같다. 여러대의 머시닝센터들이 자동창고의 랙을 따라서 배치되어 있으며 한 대의 스택크레인이 양방향으로 움직이면서 운반 및 저장 작업을 수행한다. 각 머시닝센터는 유한개의 입력버퍼와 출력버퍼를 가진다. 각 머시닝센터에서 입력버퍼와 출력버퍼의 용량은 동일한 것으로 가정한다. 머시닝센터들이 자동창고 랙의 양면 또는 한면에 배치될 수 있지만 본 연구에서는 한면에 배치된 경우만을 다루었다. 주(main) 자동창고로부터 작업장(DIO가공시스템)으로 작업물의 투입은 정해진 순서(투입순서규칙(input sequencing rule)에 의해서 결정됨)에 의해서 결정되지만, 각 머시닝센터의 입력버퍼에서 작업물의 선택은 작업물이 도착한 순서대로 선택된다. 스택크레인은 역시 해당 머시닝센터에서 작업이 끝나서 다음 가공작업을 위해서 출력버퍼에서 기다리는 작업물 중에서 작업물이 출력버퍼에 들어온 순서에 따라서 먼저 들어온 작업물을 선택한다. DIO가공시스템 내에 존재하는 자동창고시스템은 유한개의 용량을 가지며 센트럴버퍼(central buffer)의 역할을 수행한다. 스택크레인이 연속되는 다음 공정의 작업을 위해서 파렛트를 운반하려할 때 다음공정의 해당 포트가 다른 작업물의 파렛트로 점유되어 있으면, 그 파렛트는 센트럴버퍼의 빈 랙오프닝에 임시로 저장되게 되며 후에 포트가 비게 되었을 때 꺼내어져 포트로 옮겨지게 된다.

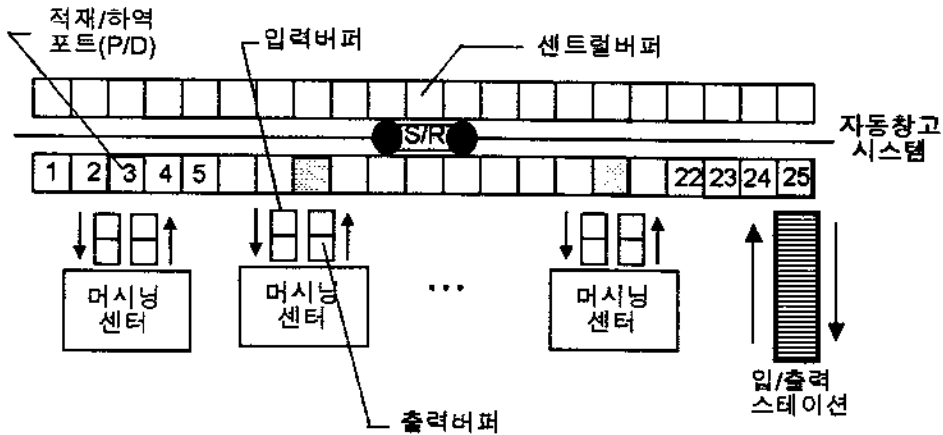
5.1 가정

모형의 현실성을 위반하지 않으면서 시뮬레이션 모형의 단순화를 위해서 다음과 같은 추가적인 가정을 한다.

- (1) 스택크레인의 가/감속은 고려하지 않는다. 즉, 스택크레인의 속도는 등속인 것으로 한다.
- (2) 머시닝센터들은 자동창고의 한쪽 면에만 배치되며 일직선을 따라서 등간격으로 배열되어 있는 것으로 한다.



<그림 4> 다구치방법을 활용한 문제해결절차



〈그림 5〉 시뮬레이션을 위한 DIO가공 시스템 모형

- (3) 스테커크레인은 한번에 한 작업물만을 운반할 수 있다.
- (4) 스테커크레인은 한대만 있는 것으로 한다.
- (5) 머시닝센터나 스테커크레인의 고장은 고려하지 않는다.
- (6) 시뮬레이션의 모든 수행에서, DIO가공시스템에 포함된 자동창고의 크기는 25(폭) × 3(높이)로 고정되어 있는 것으로 한다.
- (7) 작업물은 재방문률이 없이 모든 머시닝센터를 한번씩 방문하며, 그 방문 순서는 랜덤(random)하게 결정된다.

5.2 수행도 평가

각 운영정책에 따른 DIO가공시스템의 성능을 평가하기 위한 수행도로 평균체류시간(mean flow time)과 생산율(throughput)을 고려한다. 평균체류시간은 작업물이 투입된 시점부터 시작해서 모든 작업이 끝나서 DIO가공시스템을 떠날 때까지 작업물이 체류한 평균 시간을 의미한다. 생산율은 DIO가공시스템에 다음의 작업물이 투입된 시점부터 시작해서 마지막 작업물이 DIO가공시스템을 떠날 때까지 시간의 역수를 의미한다. 시스템의 성능을 평가하기 위해서 사용되는 평균체류시간은 생산자에게는 재공품 재고의 수준을, 서비스를 원하는 고객에게는 대기시간의 기대치를 의미하는 것으로 일반적으로 널리 사용된다. 평균체류시간과는 대조적으로 생산율은 시스템의 생산성을 나타내는 지표로 널리 사용되고 있다. 그러므로 생산율이 클수록 시스템의 생산성은 제고되고, 평균체류시간이 작을수록 효율은 높아지게 된다.

5.3 시뮬레이션의 수행방법

시뮬레이션을 수행하는 방법으로는 ① 안정상태시뮬레이션(steady state simulation)과 ② 종료시뮬레이션(terminating simulation) 방식이 있다. 본 연구에서 대상으로 하고 있는 DIO가공시스템에서는 시뮬레이션의 초기에 각 작업물의 종류와 수효(수량)가 주어지는 것으로 가정하고 있기 때문에 각 운영정책 대안들의 비교 평가시 각 대안별로 합리적인 안정상태의 시점을 책정하기가 매우 어려우며 자료의 손실이 막대하다. 따라서 본 논문에서는 종료시뮬레이션 방식을 채택하였다. 즉, 첫 번째 작업물이 투입됨과 동시에 시뮬레이션이 시작되어 마지막 작업물이 DIO가공시스템을 떠나면서 끝나게 된다.

주어진 DIO가공시스템에 대해서 시뮬레이션 전용 언어인 SLAM II와 FORTRAN 언어를 사용하여 프로그램을 구현하였으며 펜티엄(586)급의 개인용 컴퓨터에서 실험을 행하였다.

6. 실험계획 및 분석

6.1 설계변수와 잠음변수 설정

(1) 설계변수

본 연구에서는 DIO가공시스템의 운영정책 4가지를 설계변수로 삼는다. 앞 절에서 언급한 운영정책에 따른 설계변수와 각 수준을 요약하면 〈표 2〉와 같다.

〈표 2〉 설계변수와 수준

설계변수	수 준
가공물 투입순서(A)	생산평준화법(A ₁)
	부하균형법(A ₂)
	임의순서법(A ₃)
가공물 저장위치(B)	최근위치저장방식(B ₁)
	지정위치저장방식(B ₂)
	임의위치저장방식(B ₃)
스태커크레인의 작업배정(C)	선입선출법(C ₁)
	수정최단거리법(C ₂)
	최대유이운반법(C ₃)
가공물선택(D)	선입선출규칙(D ₁)
	최소공정시간규칙(D ₂)
	최단남기법(D ₃)

(2) 잡음변수

DIO가공시스템에는 여러 종류의 잡음 인자가 존재한다. 반드시 모든 잡음 인자들을 포함시킬 필요는 없지만, 어떤 잡음 인자가 설계변수의 각 수준에서 시스템의 수행도에 영향을 더 또는 덜 미치는지의 경중(輕重)을 가릴 필요가 있으며, 어떤 실험조건이 설계변수의 변동에 대한 사항을 포착하는데 적당한가에 대한 공학적인 판단이 매우 중요하다. 본 논문에서는 6가지의 잡음변수를 고려하였으며, 그 밖의 요인들은 기존의 연구결과와 경험에 비추어 중요하지 않은 것으로 판단되어 포함시키지 않았다. 선택된 잡음요인들과 각 수준을 열거하면

〈표 3〉 잡음변수와 수준

잡음변수	수 준	
	1	2
머시닝센터의 수(O)	5	10
가공물의 종류(P)	5	10
가공물의 수요(Q)	100~200	100~400
머시닝센터에서의 가공시간(R)	10~20(분)	5~35(분)
스태커크레인의 수평/수직속도(S)	20/10(미터/분)	40/20(미터/분)
입/출력버퍼의 수(T)	1	2

〈표 3〉과 같다.

6.2 실험계획

DIO가공시스템의 최적 운영정책조합 결정시 다구치 방법의 적용과 확인실험을 행하기 위해 크게 두 종류의 실험을 구성하였다. 하나는 다구치 방법의 효율성을 보이기 위한 직교배열에 기초한 일부실험이며, 다른 하나는 일부실험법을 사용하는 다구치 방법의 타당성 검토와 검증용 위한 완전요인배치법의 실험이다. 각각에 대해 간단히 설명하면 다음과 같다.

(1) 일부실험법(fractional factorial design)

본 연구에서는 설계변수 A, B, C, D의 주효과와 교호작용 AB, AC, BC를 추정하고자 한다. 기존의 연구결과(Lim(1994))와 경험으로 부터 스태커크레인의 작업배정규칙(C)과 가공물 저장위치(B)간에는 교호작용이 있으리라 기대되며, 추가적으로 가공물투입순서(A)와 가공물저장위치(B), 가공물투입순서(A)와 스태커크레인의 작업배정규칙(C)간의 교호작용에 대한 정보를 얻고자 한다. 이와 같은 효과를 모두 추정하기 위해서는 적어도 20(주효과 $4 \times 2 = 8$, 교호작용 $3 \times 2 \times 2 = 12$)의 자유도가 필요하며, 이에 적절한 내측배열로 직교표 $L_8(3^3)$ 을 선택하였다. 이 직교표는 3수준 짜리 13개의 열과 27개의 행으로 구성이 되는데 설계변수 A, B, C, D를 이 직교표의 1, 2, 5, 12열에 각각 배치하였다. 여기서 각 행은 설계변수의 수준조합인 실험점을 나타낸다. 그리고 잡음변수의 배치를 위한 외측배열로는 직교표 $L_8(2^7)$ 을 선택하였는데 이는 2수준 짜리 7개의 열과 8개의 행으로 구성되는데, 잡음변수 O에서 T를 1열에서 6열까지 각각 배치하였다. 여기서 각 행은 잡음변수의 조합인 실험조건을 의미하게 된다. 본 연구에서는 이와 같은 외측배열을 5회 반복하여 총 1080회($L_8(3^3) \times L_8(2^7) \times 5$)의 실험을 수행하여 평균체류시간과 생산율을 구한다.

(2) 완전요인배치법(full factorial design)

설계변수 A, B, C, D와 잡음변수 O, P, Q, R, S, T의 모든 주효과 및 교호작용을 분석하기 위해 $3^4 \times 2^6$ 의 요인실험을 행하며 추가적인 5회의 반복실험을 수행한다. 즉, $3^4 \times 2^6 \times 5$ 요인실험(총 25920회)을 수행하여 평균체류시간과 생산율을 구한다.

6.3 데이터 분석

(1) 상대적수행도

시스템의 수행도 중에서 '평균체류시간'은 한 가공품이 시스템에 들어간 시점부터 모든 공정이 끝나고 시스템 밖으로 나올 때까지 시스템에 머물렀던 시간의 평균치를 의미한다. 우리가 추구하고자 하는 목표는 각 설계변수의 조합이 시스템의 수행도에 영향을 주는 '변동'의 추이와 양을 알고자하는 것이다. '평균체류시간'에는 설계변수의 변화에 의해서 야기되는 변동이외에 불가피하게(설계변수의 변화에는 상관없이) 발생하는 변동의 상당한 부분을 포함하고 있다. 그러므로 순수변동 이외의 나머지를 제거하는 것이 요구된다. 그러나 실제로 시뮬레이션을 수행하면서 일일이 불가피한 체류시간을 계산하여 제거하는 것은 사실상 힘든 일이므로, 본 연구에서는 '평균체류시간' 대신 식 (4)에 기술한 바와 같이 상대적 평균체류시간을 성능기준으로 삼는다.

$$\text{상대적 평균체류시간} = \{\text{평균체류시간}\} - \{27\text{개의 '평균체류시간' 중에서 최소값}\} \quad (4)$$

그러므로 본 연구에서는 '평균체류시간'에 대한 모든 분석은 '상대적 평균체류시간'을 대상으로 수행한다.

(2) 일부실시법을 쓸 때 결과분석

① SN비의 계산

상대적평균체류시간은 작을수록 좋은 특성이므로 망소특

성에 해당하며 각 실험점에서의 SN비, $\eta_i(i=1, \dots, 27)$ 는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{40} \sum_{j=1}^{40} a_{ij}^2 \right\} \quad (5)$$

여기서 a_{ij} 는 i 번째 설계변수조합(실험점), j 번째 잡음조합에서 관측된 상대적 평균체류시간을 나타낸다. $40(=8 \times 5)$ 은 반복수를 의미하는데 잡음변수의 조합에 대한 8회의 부분실험과 5회 반복실험을 의미한다. η 를 최대로 하는 것은 상대적 평균체류시간이 이상(理想)치 0으로 부터 벗어남으로써 발생하는 품질손실을 최소화하는 것과 같다.

반면에 생산율은 클수록 좋은 특성인 망대특성이므로 각 실험점에서의 생산율에 대한 SN비는 다음과 같이 구해진다.

$$\eta'_i = -10 \log \left\{ \frac{1}{40} \sum_{j=1}^{40} \frac{1}{b_{ij}^2} \right\} \quad (6)$$

여기서 b_{ij} 는 i 번째 설계변수조합(실험점), j 번째 잡음조합에서 관측된 생산율이다.

② SN비에 대한 분산분석

위와같이 성능척도인 SN비가 계산되면 다음 단계는 각 성능척도에 대하여 효과의 유의성을 평가하는 것이다. <표 4>와 <표 5>는 η 와 η' 에 대한 분산분석표를 나타낸다.

<표 4>와 <표 5>의 분산분석표로부터 가공품의 투입순서(A)는 생산율에 매우 큰 영향을 미치고 있으며 평균체류시간

<표 4> η 에 대한 분산분석표

요인	자유도	제곱합	제곱평균	F 값	Pr>F
모형	20	194.19709133	9.70985457	84.10	0.0001
오차	6	0.69271446	0.11545241		
합계	26	194.88980579			
A**	2	9.71931847	4.85965923	42.09	0.0003
B**	2	164.48261171	82.24130585	712.34	0.0001
C**	2	12.46163222	6.23081611	53.97	0.0001
D	2	0.02871619	0.01435810	0.12	0.8853
A×B*	4	3.02217723	0.75554431	6.54	0.0223
A×C	4	0.65166677	0.16291669	1.41	0.3357
B×C*	4	3.83096873	0.95774218	8.30	0.0127

* : 유의수준 0.05 일 때 통계적으로 유의함

** : 유의수준 0.01 일 때 통계적으로 유의함

〈표 5〉 η' 에 대한 분산분석표

요인	자유도	제곱합	제곱평균	F 값	Pr>F
모형	20	0.60342105	0.03017105	29.69	0.0002
오차	6	0.00609712	0.00101619		
합계	26	0.60951817			
A**	2	0.44584441	0.22292220	219.37	0.0001
B	2	0.00522006	0.00261003	2.57	0.1564
C**	2	0.12054024	0.06027012	59.31	0.0001
D	2	0.00398699	0.00199349	1.96	0.2210
A×B	4	0.01232357	0.00308089	3.03	0.1090
A×C	4	0.00365644	0.00091411	0.90	0.5190
B×C	4	0.01184935	0.00296234	2.92	0.1169

** : 유의수준 0.01 일 때 통계적으로 유의함

〈표 6〉 평균체류시간과 생산율에 유의한 영향을 미치는 요인들(유의수준 0.05일때)

수행도	구 분	통계적으로 유의한 요인
평균체류시간	주효과	B > C > A†
	교호작용	B×C > A×B
생산율	주효과	A > C
	교호작용	-

† : X>Y의 의미는 요인 X가 요인 Y 보다 수행도에 대한 기여도가 큼을 의미한다.

에도 약간의 영향이 있음을 알 수 있다. 반면에 가공물을 자동창고에 저장하는 방식(B)은 평균체류시간에 가장 큰 영향을 미치고 있으나 생산율에는 영향이 없다. 스택크레인의 작업배정규칙(C)은 평균체류시간과 생산을 모두에 중간의 영향을 미치고 있다. 그리고 가공물선택규칙(D)은 두 특성치에 아무런 영향이 없음을 알 수 있다. 또한 가공물의 투입순서(A)와 가공물을 자동창고에 저장하는 방식(B)간, 자동창고에 저장하는 방식(B)과 스택크레인의 작업배정규칙(C)간 교호작용은 평균체류시간에 영향이 있는 것으로 파악이 되었다. 요약하면 〈표 6〉과 같다.

함을 알 수 있다. 그런데 평균체류시간에 대하여는 가공물의 투입순서(A)와 가공물을 자동창고에 저장하는 방식(B), 자동창고에 저장하는 방식(B)과 스택크레인의 작업배정규칙(C)간 교호작용이 존재하므로 이들 변수의 최적조건은 개별적

③ 최적운영정책의 결정

앞의 분산분석의 결과를 토대로 유의한 효과에 대한 수준별 SN비의 평균을 〈표 7〉에 나타내었다. 〈표 7〉로 부터 가공물의 투입순서는 생산평준화법(A)을, 스택크레인의 작업배정규칙은 수정최단거리법(C)을 이용하는 것이 생산율을 최대로

〈표 7〉 수준별 η 와 η' 의 평균

		상대적 평균체류시간	생산율
A	1	24.5792222	7.10471111
	2	24.4546444	7.01866667
	3	23.2487667	6.79947778
B	1	27.4971000	
	2	21.7195778	
	3	23.0659556	
C	1	23.7415778	6.99044444
	2	25.0445111	7.04683333
	3	23.4965444	6.88557778

〈표 8〉 교호작용에 대한 이원표 (η)

		A			C		
		1	2	3	1	2	3
B	1	28.2438	27.9469	26.3005	26.4824	29.0484	26.9604
	2	21.6463	22.0571	21.4552	21.6623	22.2544	21.2419
	3	23.8474	23.3598	21.9906	23.0799	23.8306	22.2872

으로 결정하지 않고 〈표 8〉의 이원표로부터 동시에 결정해야 한다. 이원표로부터 가공물의 투입순서는 생산평준화법(A), 가공물을 자동창고에 저장하는 방식으로는 최근위치저장방식(B), 스택크레인의 작업배정규칙으로는 수정최단거리법(C)가 η를 최대, 즉 평균체류시간을 최소로함을 알 수 있다. 이는 각 변수들의 주효과만을 고려하여 최적수준을 정하더라도 마찬가지로 결과를 얻을 수 있다. 요약하면 평균체류시간을 최소로 하는 최적수준은 A,B,C이고 생산율을 최대로 하는 최적수준은 A,C이다. 가공물의 선택규칙(D)은 적어도 DIO가공시스템에서는 유의한 영향을 미치지 않는 것으로 생각되므로 비용이나 편리성을 고려하여 적절한 수준으로 결정하면 된다.

결론적으로 DIO가공 시스템의 최적운영정책은 A,B,C(D)로 결정할 수 있다.

(3) 완전요인배치법을 쓸 때 결과분석

앞에서 수행한 일부실시법에 의해서 결정된 최적운영정책의

타당성을 확인하기 위해서 완전요인배치법(full factorial design)에 의한 실험 (3' × 2' × 5)을 수행하였다. 완전요인배치법의 실험에서도 평균체류시간에 대해서는 상대적 평균체류시간을 다음과 같이 정의하여 사용하였다.

$$\text{상대적 평균체류시간} = \frac{\{\text{평균체류시간}\} - \{\text{3'개의 평균체류시간 중에서 최소값}\}}{\dots} \quad (7)$$

SN비의 계산은 앞의 식(5)와 식(6)에서 반복수만을 40에서 320 (=2' × 5)로 수정하여 사용하였다.

① 평균체류시간을 최소화하는 최적운영정책의 결정

수행도가 평균체류시간인 경우의 시뮬레이션 결과에 대한 분산분석표, SN비의 수준별 평균 및 교호작용에 대한 이원표가 〈표 9〉, 〈표 10〉, 〈표 11〉에 주어진다.

〈표 9〉로부터 가공물의 투입순서(A), 저장위치(B), 스택크레인의 작업배정규칙(C)이 평균체류시간에 영향을 미치는 요인임을 알 수 있다. 그러나 가공물의 투입순서(A)와 스택크레인의 작업배정규칙(C), 가공물의 저장위치(B)와 스택크레인의 작업배정규칙(C)간에 유의한 교호작용이 존재하므로 개별적으로 최적의 운영정책을 결정할 수 없다. 물론 A × B, C × D간에도 교호작용이 유의한 것으로 나타나지만 전체 변동에 대한 기여도가 매우 작으므로 최적조합을 결정하는데는 고려하지 않아도 괜찮을 것으로 생각된다. 〈표 11〉의 교호작용

〈표 9〉 평균체류시간에 대한 분산분석표(완전요인배치법의 경우)

요인	자유도	계급합	계급평균	F 값	Pr>F
모형	32	1060.80406585	33.15012706	974.47	0.0001
오차	48	1.63289082	0.03401856		
합계	80	1062.43695667			
A**	2	7.65037452	3.82518726	112.44	0.0001
B**	2	171.54047366	85.77023683	2521.28	0.0001
C**	2	761.51170739	380.75585369	11192.59	0.0001
D	2	0.01132936	0.00566468	0.17	0.8471
A × B**	4	2.19227192	0.54806798	16.11	0.0001
A × C**	4	64.39873536	16.09968384	473.26	0.0001
A × D	4	0.10293450	0.02573363	0.76	0.5587
B × C**	4	52.75344686	13.18836171	387.68	0.0001
B × D	4	0.05053626	0.01263406	0.37	0.8279
C × D**	4	0.59225602	0.14806401	4.35	0.0044

** : 유의수준 0.01 일 때 통계적으로 유의함

에 대한 이원표로부터 평균체류시간을 최소로 하는 운영정책을 정한다. 우선, B×C의 교호작용의 기여도가 제일 크므로

〈표 10〉 요인의 수준별 상대적 평균체류시간의 SN비의 평균

요인	수준	상대적 평균체류시간
A	1	20.2038333
	2	20.6475370
	3	20.9523407
B	1	22.6419704
	2	19.3501519
	3	19.8115889
C	1	16.3918370
	2	23.6074815
	3	21.8043926

먼저 B와 C의 수준을 정하면 B,C이다. 다음으로 A×C의 교호작용이 유의하므로 A와 C를 〈표 11〉로부터 동시에 정하면 A,C이다. 종합적으로 평균체류시간을 최소로하는 최적의 운영정책조합은 A,B,C(D)가 됨을 알 수 있다. 여기서 D는 평균체류시간에 유의한 영향을 미치지 못하므로 상황에 따라 적절한 값으로 결정하면 된다.

② 생산율을 최대화하는 최적운영정책의 결정

수행도가 생산율인 경우의 시뮬레이션 결과에 대한 분산분석표, SN비의 수준별 평균 및 교호작용에 대한 이원표는 각각 〈표 12〉, 〈표 13〉, 〈표 14〉에 주어진다.

〈표 12〉로부터 가공물의 투입순서(A), 저장위치(B), 스택크레인의 작업배정규칙(C), 가공물선택(D)등 모든 설계요인이 생산율에 유의한 영향을 미침을 알 수 있다. 단, 저장위치(B)

〈표 11〉 교호작용에 대한 상대적 평균체류시간의 이원표(완전요인배치법)

		A			B		
		1	2	3	1	2	3
C	1	15.1654333	15.4938556	18.5162222	17.0157667	16.3061111	15.8536333
	2	23.6493333	24.2443333	22.9287778	26.7090333	21.3034111	22.8100000
	3	21.7967333	22.2044222	21.4120222	24.2011111	20.4409333	20.7711333

〈표 12〉 생산율에 대한 분산분석표(완전요인배치법의 경우)

요인	자유도	제곱합	제곱평균	F 값	P>F
모형	32	1.57633265	0.04926040	826.37	0.0001
오차	48	0.00286131	0.00005961		
합계	80	1.57919396			
A**	2	0.86332986	0.43166493	7241.41	0.0001
B**	2	0.03388157	0.01694078	284.19	0.0001
C**	2	0.61187810	0.30593905	5132.29	0.0001
D**	2	0.01336639	0.00668320	112.11	0.0001
A×B**	4	0.00589415	0.00147354	24.72	0.0001
A×C**	4	0.00183484	0.00045871	7.70	0.0001
A×D*	4	0.00074762	0.00018690	3.14	0.0227
B×C**	4	0.04514943	0.01128736	189.35	0.0001
B×D	4	0.00010168	0.00002542	0.43	0.7888
C×D	4	0.00014902	0.00003725	0.62	0.6470

* : 유의수준 0.05 일 때 통계적으로 유의함

** : 유의수준 0.01 일 때 통계적으로 유의함

〈표 13〉 요인의 수준별 생산율에 대한 SN비의 평균
(완전요인배치법의 경우)

요인	수준	생산율
A	1	6.97652593
	2	7.02488148
	3	6.78574074
B	1	6.95767407
	2	6.91832963
	3	6.91114444
C	1	6.96266667
	2	7.01462963
	3	6.80985185
D	1	6.91621111
	2	6.94660000
	3	6.92433704

〈표 14〉 교호작용에 대한 생산율의 이원표
(완전요인배치법의 경우)

		B		
		1	2	3
C	1	7.00445556	6.93877778	6.94476667
	2	7.00322222	7.04410000	6.99656667
	3	6.86534444	6.77211111	6.79210000

와 가공물선택(D)은 상대적으로 전체변동에서 차지하는 비율이 매우 낮으므로 A와 C에 주안점을 두어 최적 운영정책을 결정하면 된다. 그러나 스택크레인의 작업배정규칙(C)과 가공물의 저장위치(B) 간에는 유의한 교호작용이 존재하므로 B와 C는 개별적으로 결정하지 않고 〈표 14〉로 부터 한꺼번에 결정한다. 물론 여기서도 $A \times B$, $A \times C$, $A \times D$ 등의 교호작용도 통계적으로는 유의한 것으로 되어있지만 전체 변동에 대한 기여도가 매우 낮은 수준이어서 최적 조합을 결정하는데는 고려하지 않아도 괜찮을 것으로 생각한다. 〈표 14〉로 부터 C와 B의 최적 수준을 동시에 결정하면 B_2C_3 가 된다. 또한 〈표 13〉으로 부터 A의 최적 수준은 A_2 가 된다. D는 어떤 정책을 선택하여도 전체적으로 큰 영향을 미치지 않지만 〈표 13〉으로 부터 D_2 로 결정하면 무리가 없을 것으로 생각한다. 종합적으로 생산율을 최대화하는 최적의 운영정책조합은 $A_2B_2C_3D_2$ 가 된다.

③ 평균체류시간과 생산율을 동시에 고려한 최적운영정책

평균체류시간만을 고려할 경우의 최적운영정책은 $A_2B_2C_1(D)$ 이며, 생산율 만을 고려할 경우의 최적운영정책조합은 $A_2B_2C_3D_2$ 가 된다. A와 C의 최적 수준은 일치함을 알 수 있고 D는 어떤 수준으로 정하여도 무방할 것이므로 D_2 로 결정하면 된다. 다만 B가 두 가지의 수행도 측면에서 상충되는데 〈표 10〉과 〈표 13〉을 살펴보면 B만을 고려할 경우는 B₁에서 평균체류시간 및 생산율의 모든 면에서 최적의 수행도를 주므로 B₁으로 결정하는 것이 바람직할 것이다. 결과적으로 평균체류시간과 생산율을 동시에 고려한 최적운영조합은 $A_2B_1C_3D_2$ 이다. 다시말해서 가공물 투입순서는 부하균형법, 저장위치는 최근위치저장방식, 스택크레인의 작업배정은 수정최단거리법, 가공물선택은 최소공정시간규칙을 사용하는 것이 DIO가공시스템을 운영하는 로버스트한 최적운영정책조합이 된다.

6.4 다구치 방법의 타당성 검토

앞 절에서 DIO가공시스템에서의 로버스트한 최적운영정책의 조합을 찾아내기 위한 방법으로 사플레이선과 다구치방법을 제시하였다. 또한 다구치 방법의 타당성을 보여주기 위해서 직교배열에 의한 일부실시법과 완전요인배치법의 실험을 추가적으로 수행하였다. 두 방법에 의해서 얻어진 최적운영정책조합을 요약하면 〈표 15〉와 같다.

〈표 15〉 일부실시법과 완전요인배치법에 의한 결과 비교

	일부실시법	완전요인배치법
DIO가공시스템의 최적운영정책조합	$A_2B_1C_3(D)$	$A_2B_1C_3D_2$

〈표 15〉에서 보여지는 것처럼 일부실시법과 완전요인배치법의 결과는 B, C, D의 설계변수에 대해서는 같은 결과가 나왔으며 단지 가공물의 투입순서규칙(A)에서만 다른 결과를 보이고 있음을 알 수 있다. 다구치 방법이 직교배열에 의한 일부실시법(즉, 본 연구에서는 완전요인배치법에 비해서 1/24의 실험만 수행함)에 근간을 두고 있음을 감안할 때 매우 의미 있는 결과가 얻어졌음을 알 수 있다.

다구치 방법은 일반적인 실험계획법과는 달리 부분실험을 수행하므로 결정된 인자의 최적수준조합은 실제로 실험이 행

〈표 16〉 확인 실험에 의한 결과비교

방법	실험점	평균체류시간	생산율
다구치 방법 (일부실시법 적용)	A,B,C,(D)	188.0076	2.46437
일반적인 방법 (완전요인배치법 적용)	A,B,C,D ₁	187.8978	2.47019
편차(%) [†]		0.058	0.236

$$† : \text{편차}(\%) = \frac{|\text{일부실시법에 의한 수행도값} - \text{완전요인배치법에 의한 수행도값}|}{\text{완전요인배치법에 의한 수행도값}} \times 100$$

하여지지 않은 점에서 나올 수 있다. 그러므로 다구치 방법(일부실시법 사용)에 의해서 얻어진 최적수준조합은 반드시 확인 실험을 수행하여야 한다. 본 연구에서도 다구치 방법에 의해서 얻어진 A,B,C,(D) 조합에 대해서 확인실험을 수행하였다. 완전요인배치법에서와 마찬가지로 A,B,C₁ 점에서 960회(=잡음변수 모든 조합 2³가지) × {D 요인의 3수준} × {5회의 반복 실험})을 통해서 평균체류시간과 생산율에 대한 결과치를 얻었으며 그 평균치를 나타내면 〈표 16〉과 같다. 〈표 16〉에는 완전요인배치법에 의해서 얻어진 전체 최적운영정책조합과의 비교를 위해서 A,B,C,D₁에 대한 수행도 결과치도 함께 보여준다.

〈표 16〉으로 부터 다구치방법에 의해서 얻어진 최적운영정책 조합이 매우 우수한 조합이며 완전요인배치법에 의해서 얻어진 전체 최적 운영정책조합에 대해서 평균체류시간, 생산율 모두에서 0.058% 0.236%이내에 접근함을 알 수 있다.

결론적으로 DIO가공시스템의 최적운영정책을 결정하는데 다구치방법을 사용함으로써 다음과 같은 성과를 거둘 수 있을 것을 알 수 있다.

- ① 부분실험만을 통해서도 최적점 또는 최적점에 매우 근접한 점을 찾아낼 수 있으므로 실험이나 시뮬레이션 등의 수행을 위한 시간 및 비용의 대폭적인 절감이 가능하다.
- ② 다구치방법은 잡음요인을 실험의 내부에 포함시킴으로써 내·외부의 잡음에 둔감한(로버스트)한 결과치를 얻을 수 있어서 실제시스템의 환경이 다소 변화하더라도 얻어진 최적성이 그대로 유지될 수 있다.
- ③ 시뮬레이션과 다구치방법을 결합함으로써 수리적으로 모

형화가 불가능한 이산적인 조합형태를 가지는 많은 문제의 최적화에 좋은 효과를 거둘 수 있다.

7. 결 론

최적 정책을 수립하기 위해 가능한 모든 운영요소와 설계요소를 고려한 조건에서의 성능 평가는 보다 나은 결과를 제공할 수 있으나 앞에서 언급한 바와 같이 그 시간적, 경제적 효율성은 떨어지게 마련이다. 다구치 방법에 의하면 최적 결정을 위해 탐색해야 하는 평가 영역을 경제적으로 축소시키는 것이 가능하다. 이는 부분적인 정보의 손실을 감수해야 가능한 것이지만 이를 통해 획득할 수 있는 효율성은 그 손실을 충분히 보상하는 경우가 많다. 따라서 다구치 방법을 이용함으로써 얻는 가장 큰 효과는 새로운 DIO가공시스템이 개발되었을 때 이를 운영하기 위한 정책 수립을 능률적으로 수행할 수 있다는 데 있다.

또한 다구치 방법을 이용하면 개별적인 정책요소가 DIO가공시스템의 전체 성능에 어떤 영향을 미치는가를 분석할 수 있으며 아울러 DIO가공시스템 설계요소와의 정량적, 정성적 인과관계의 파악이 용이해진다. 이와 같은 특징은 DIO가공시스템 설계 변경시 어느 정책요소를 수정하여 운영 정책을 보전해야 하는가에 대한 해답을 찾기 위한 객관적인 근거로도 활용할 수 있다. 추가로 다구치 방법에 의하면 DIO가공시스템의 설치나 운영과 관계되는 환경적인 요소들(관리자가 직접 제어하기 어렵지만 시스템 성능에 중요한 영향을 주는 요소들)에 대해서 각 운영요소가 어떤 경향을 보이는가를 연구할 수 있다. 이는 환경적인 요소들의 값이 변화하더라도 보다 일관성있는 시스템 성능을 보장하는 운영 정책을 선별할 수 있

음을 의미하는 것이며, 나아가 보다 최적의 DIO가공시스템 설계를 위한 피드백 또는 가이드라인의 역할도 수행할 수 있다.

이러한 맥락에서 본 연구에서는 이산적인 조합형태를 가지는 문제에 시뮬레이션과 다구치방법을 접목하는 방법론을 제시하였고 DIO가공시스템에 적용하여 의미있는 결과를 도출할 수 있었다.

따라서 본 연구의 결과로 부터 DIO가공시스템의 최적의 운영정책을 결정하기 위해 시뮬레이션과 다구치 방법을 접목하여 사용함으로써 DIO가공시스템을 도입, 운영하려는 시스템 사용자에게, 1) 시스템의 환경에 다스간의 변화가 있더라도 그 변화에 의한 영향의 정도를 크지 않게 하는 로버스트(robust)한 운영정책들의 최적조합을 찾을 수 있게 하고, 2) 일반적인 실험계획에 의한 방법보다 훨씬 적은 횟수의 실험에 의해 최적 운영방안 결정과정의 효율성과 경제성을 제고하고, 3) DIO가공시스템을 새로이 도입하고자 하는 시스템 관리자에게 정책결정의 기준을 제공할 수 있다.

[참 고 문 헌]

- [1] 다구치, 품질설계를 위한 실험계획법(품질공학강좌4), 한국공업표준협회, 1991.
- [2] 염봉진, 고선우, 김성준, "제품 및 공정설계를 위한 다구치 방법," 경영과학, 7권, 2호, 1990, 3-21.
- [3] 염봉진, 서순근, 변재현, 실험계획 및 분석: 다구치 방법과 적교배열의 활용, KAIST 산학협동공개강좌, 1993.
- [4] Chow, W. M., "An analysis of automated storage and retrieval systems in manufacturing assembly lines," IIE Transactions, June, 1986, 204-214.
- [5] Egbelu, P. J. and J. M. A. Tanchoco, "Characterization of automatic guided vehicle dispatching rules," International Journal of Production Research, 22(3), 1984, 359-374.
- [6] Han, M. H. and L. F. McGinnis, "Control of material handling transporter in automated manufacturing," IIE Transactions, 21(2), 1989, 194-189.
- [7] Han, S. D., A study on the development of dispatching rules for automated guided vehicles in automated manufacturing systems, M.S. thesis, Han Yang University, 1989.
- [8] Hausman, W. H., L. B. Schwarz and S. C. Graves, "Optimal storage assignment in automatic warehousing system," Management Science, 22(6), 1976, 629-638.
- [9] Kusiak, A., "Material handling in flexible manufacturing system," Material Flow, 2, 1985, 79-95.
- [10] Lim, J. M., Design and operation problems in a flexible manufacturing system with built in automated storage/retrieval system, Ph.D Dissertation, KAIST, 1994.
- [11] Lim, J. M., K. S. Kim, B. J. Yum, and H. Hwang, "Determination of an optimal configuration of operating policies for direct-input-output manufacturing systems using the Taguchi method," Proceedings of 18th International Conference on ICC&IE'95, Shanghai, China, 1995, 72-77.
- [12] Mayer, R. J. and P. C. Benjamin, "Using the Taguchi paradigm for manufacturing system design using simulation experiments," Computers and Industrial Engineering, 22(2), 1992, 195-209.
- [13] Monden, Y., Toyota production system, Institute of Industrial Engineering Press, Norcross, GA, 1983, 181-192.
- [14] Panwalker, S. S. and W. Iskander, "A survey of scheduling rules," Operations Research, 25(1), 1977, 45-61.
- [15] Phadke, M. S., Quality engineering using robust design, Prentice-Hall International, Inc., 1989.
- [16] Pristker, A. ALAN B., Introduction to simulation and SLAM II, John Wiley & Sons, Inc., New York, 1986.
- [17] Shoemaker, A. C., K. L. Tsui, and C. F. J. Wu, "Economical experimentation methods for robust design," Technometrics, 33(4), 1991, 415-427.
- [18] Tansel, B. C. and A. S. Kiran, "Optimum central storage location in flexible manufacturing cells," Journal of Manufacturing System, Vol.7, 1988, 121-129.
- [19] Wittrock, R. J., "Scheduling algorithms for flexible flow lines," IBM Journal of Research Development, 29(4), 1985, 401-412.



임준목
 1988년 서울대학교 산업공학과
 공학사
 1990년 한국과학기술원 산업공
 학과 공학석사
 1994년 한국과학기술원 산업공
 학과 공학석사
현 재 대전산업대학교 산업공
 학과 조교수
관심분야 물류시스템분석 및 설계,
 시뮬레이션, 공장자동화

김길수
 1991 한양대학교 산업공학과
 학사
 1994 한국과학기술원 산업공
 학과 석사
현 재 한국과학기술원 산업공
 학과 박사과정
관심분야 품질공학(다구치 방법),
 계층 및 공정설계, 통계
 적 공정관리



성기석
 1984년 서울대학교 산업공학과
 학사
 1986년 서울대학교 대학원 산업
 공학과 석사
 1990년 서울대학교 대학원 산업
 공학과 박사
현 재 강릉대학교 산업공학과
 부교수
관심분야 경영과학, 경영정보시스
 템, 지리정보시스템, 산
 업시뮬레이션