

# 안정성 설계방법을 이용한 자동흐름라인의 완충재고용량 할당

서순근<sup>1</sup> · 정원기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>동아대학교 산업공학과 / <sup>2</sup>한국가스안전공사

## Allocation of Buffer Capacity in Automatic Transfer Line Using Robust Design Method

Sun-Keun Seo<sup>1</sup> · Won-Kee Chung<sup>2</sup>

Several researchers have previously studied the problem of allocating buffer storage to maximize the throughput rate and/or minimize the mean buffer average of a transfer line for a given total amount of buffer space. But there seems to be very little difference in performance between intuitively reasonable and optimal allocations.

This paper proposes and illustrates a methodology, based on the robust design concept of Taguchi, to allocate buffer storage of long transfer lines with a given total amount of buffer capacity when up and down times follow exponential distributions, respectively. We show how this procedure using simple heuristic rule can be used for design of long transfer lines.

### 1. 서론

자동흐름라인(automatic transfer line)은 다수의 자동화된 작업장 또는 검사 작업장이 직렬 라인으로 구성되어 작업물의 이송이 자동적으로 수행되며 작업물은 첫번째 작업장을 통하여 들어 와서 마지막 작업장을 통하여 시스템을 떠나고 라인에서 머무는 시간은 확률적이다(Buzacott, 1967). 이것은 가공시간, 고장 및 수리시간의 확률적 성질에 의해서 발생되며 저장공간은 일반적으로 유한한 용량을 가지고 각 작업장과 완충재고공간을 순차적으로 이동한다. 자동흐름라인의 전형적인 형태는 <그림 1>과 같다.

완충재고공간은 작업장에 고장이 발생한 경우 인접 작업장에 대한 영향을 일부 감소시키지만 작업장의 가공속도, 고장을 및 수리율의 차이로 인하여 부족(starving)현상과 봉쇄(blocking)현상이 발생하게 되며 이런 경우 라인의 생산율은 영향을 많이 받게 된다.

이러한 완충재고영역을 제공하는 것은 충분한 공간확보의 부족 및 미완성된 부품의 유지비가 높을 때는 여의치 않다. 라인에 따라 완충재고공간의 설치가 가능한 경우에는 완충재고공간의 수, 완충재고공간의 위치, 완충재고영역의 크기를 결

정하는 각 완충재고용량의 할당방법이 라인의 설계에서 중요하다. 즉 자동흐름라인의 설계에서 각 작업장 사이의 완충재고공간에 대한 용량이 유한한 경우에는 강제 정지(forced down) 등이 존재하므로 이를 효율적으로 감소시키기 위해 완충재고공간의 용량을 적절히 할당하여야 하나 이들 용량을 결정하는 것은 쉽지 않다.

자동흐름라인은 동기화된 라인과 비동기화된 라인으로 구분한다. 동기화된 라인은 가공시간이 확정적이며 동일한 작업장으로 이루어진 라인으로 고장과 수리현상은 기하분포로 모형화되며, 비동기화된 라인은 가공시간이 확정적이거나 확률적이면서 각 작업장의 가공시작과 종료가 동일한 시점에서 이루어지지 않으며 고장시간과 수리시간이 지수분포를 따르는 경우로 정의한다.

따라서 라인의 설계시 비동기화된 라인 중에서 확률적(지수분포 가정) 및 확정적 가공시간과 지수분포를 따르는 고장 및 수리시간을 가진 경우에 적용이 용이하고 간략한 용량할당 규칙을 찾기 위하여 다구치의 안정성 설계방법(robust design, parameter design)을 이용하여 다양한 설계조건에서도 둔감한 완충재고용량 할당을 위한 발견적 방법을 구하고자 한다. 즉 다구치의 안정성 설계방법(Phadke, 1989; Taguchi, 1993)은 1980년 이후 산업공학 및 응용통계학자들에게 관심이 되고 있으며,

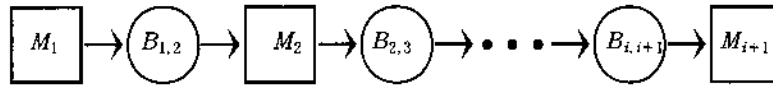


그림 1. 자동흐름라인의 전형적인 예.

이런 방법론을 OR 모형의 설계와 컴퓨터 시뮬레이션의 실험 계획에 활용하는 연구가 최근에 시도되고 있다.

확률적 라인에 대한 연구는 먼저 완벽한 작업장으로 이루어진 라인에서 생산율을 최대화하는 문제는 Powell(1994)에 의해서 휴리스틱 방법이 개발되었고, Chow(1987)는 동적계획법을 이용하였으며, 완벽하지 않은 작업장으로 이루어진 라인은 Conway *et al.*(1988)에 의해서 완충재고용량 할당문제의 최적화를 위한 동적계획법이 제시되었고, 평균완충재고의 최소화 문제는 Alriok and Stidham(1983)과 Park(1993)에 의하여 탐색법에 의한 최적할당방법이 제시되었다. 가공시간이 확률적이고 완벽하지 않은 작업장으로 이루어진 라인에 관한 생산율 등의 성능측도 평가는 Gershwin and Berman(1981), Choong and Gershwin(1987)에 의하여 정확한 분석법(2개의 작업장)과 분해법이 개발되었고 Dallery *et al.*(1988)에 의하여 분해법의 효율적인 반복 알고리즘이 제시되어 있으나 완충재고영역의 할당에 관해서 적용 가능한 구체적인 결과를 제공하는 연구는 드물다. 자동흐름라인의 모형을 포함한 생산흐름라인과 관련된 전반적인 연구결과는 Dallery and Gershwin(1992)에 의하여 요약 및 정리되어 있다. 그리고 본 논문과 유사한 방법으로 가공시간이 확정적이고 동기화된 라인에 대한 연구가 서순근 등(1998)에 의하여 수행되었다.

## 2. 모형의 설계

완충재고공간의 설계에 관한 초기 연구들은 2개의 작업장으로 이루어진 유한한 완충재고용량을 가지는 경우와 보다 긴 라인에 대해 모든 작업장 사이의 같은 완충재고용량을 가지는 경우에 초점을 두고 있었으며, 그 후 시스템의 성능측도를 기준으로 완충재고용량을 동적계획법, 시뮬레이션 및 발견적 방법 등을 이용하여 할당하고 있으나 이들 방법들에 의해서 구한 해는 3단계 이상의 라인에 대한 생산율의 정확한 계산이 거의 불가능하므로 최적성이 보장되지는 않는다.

본 논문의 자동흐름라인은 가공시간이 확률적(지수분포)인 경우와 확정적인 경우에 고장시간과 수리시간이 지수분포를 따를 때  $i$ 번째 작업장의 (평균)가공시간, 고장율과 수리율을  $\mu_i$ ,  $\beta_i$ 와  $q_i$ 로 정의한다.

### (1) 완충재고용량의 할당방법

적절한 완충재고공간의 크기 결정 및 할당을 위하여 많은

연구가 이루어져 왔는데 이들에 관한 연구는 주로 생산율을 최대화하는 문제로서 식 (1)과 같이 정식화할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max \quad & \eta(\mathbf{b}) \\ \text{s.t.} \quad & \sum_j a_{ij} b_i \leq B \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,  $\eta(\mathbf{b})$ 는 생산율,  $\mathbf{b}=[b_i]$ (벡터),  $B$ 는 총 완충재고용량,  $b_i$ 는  $i$ 번째 완충재고 ( $B_{i,i+1}$ )의 용량,  $a_{ij}$ 는  $j$ 번째 제약식에서 완충재고  $i$  ( $i=1, \dots, n-1$ )에 관련된 계수이다.

자동흐름라인을 운영하는 기업 입장에서는 완충재고공간의 설치비보다 재고유지비에 관심을 가질 수 있는데, 평균완충재고의 최소화는 생산시간을 단축시킬 수 있는 부수 효과가 있으므로 이것도 생산체계의 성능측도로 삼을 수 있다. 총 완충재고영역을 최소화하는 문제는 대부분 식 (2)와 같이 정식화된다.

$$\begin{aligned} \min \quad & \sum b_i \\ \text{s.t.} \quad & \eta(\mathbf{b}) \geq \eta^0 \\ & \sum a_{ij} b_i \leq B \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $\eta^0$ 은 최저요구생산율이다.

따라서 본 연구는 생산율과 평균완충재고를 성능측도로 삼아 주어진 총 완충재고용량하에서 각 작업장 사이의 완충재고용량을 결정하고자 한다. 그러나 이런 형태의 설계문제에서 고려될 수 있는 완충재고공간의 수와 위치를 설계변수에 포함시키지 않고 모든 작업장 사이에 완충재고공간을 설치하는 경우로 한정하였다.

### (2) 완충재고용량의 할당방법

생산율을 최대화하기 위한 완충재고용량의 할당은 완충재고공간의 수, 위치와 총 완충재고용량에 의해서 수행될 수 있는데, 본 논문의 관심 대상인 완충재고용량의 할당방법은 서순근 등(1998)에서 고려된 방법으로서 자동흐름라인의 다양한 설계조건하에서도 우수한 해를 제공할 수 있는 경험적 규칙을 대상으로 삼고자 한다. 또한 자동흐름라인을 포함하는 가변가공시간을 가지는 생산라인의 설계시에 기존 연구(Chow, 1987; Conway *et al.*, 1988; Hillier and So, 1991)들도 경험적 법칙(rule of

thumb)의 활용을 추천하고 있다.

각 완충재고용량을 할당하는 방법은 가장 간단한 규칙인

- (i) 동일하게 할당하는 방법
- (ii) 각 작업장이 동일하지 않지만 완벽한 작업장으로 이루어진 라인 은 역(reversibility)의 성질 (Dallery and Gershwin, 1992)을 적용한 후 완충재고용량의 크기를 정할 수 있는데 이런 "bowl" 현상을 이용한 위로 블록한 형태의 완충재고용량의 할당방법
- (iii) Masso and Smith(1974), So (1997)에 의해서 제시된, 후 작업장에 전 작업장보다 더 큰 완충재고용량을 할당하는 단조증가 형태
- (iv) Law(1983)에 의해서 고려된 아래로 블록한 형태의 완충재고용량에 대한 할당방법
- (v) 완충재고용량을 단조감소형태로 할당하는 5가지 경우를 대상으로 선정할 수 있다.

그 밖에 각 작업장의 수리시간은 완충재고용량에 직접적인 영향을 미치므로 각 작업장 사이의 용량을 수리율에 따라 비례적으로 할당하는 방법으로, 즉 수리율을 이용하여 총 용량을  $q_i, q_{i+1}, \bar{q}_{i,i+1} = (q_i + q_{i+1})/2$  중에서 선택하여 비례적으로 배분할 수 있다. 또한 Sheskin (1976)은 신뢰도가 낮은 작업장 사이에 더 큰 용량의 할당을 제시하고 있으므로  $i$ 와  $i+1$  번째 작업장 사이에서 완충재고용량을 작업장의 고장율과 수리율로서 식 (3)과 같이 표현되는 작업장의 개별생산율 또는 가용도 (isolated production rate:  $e_i$ )를 이용하여 각 작업장 사이에 완충재고용량을 할당할 수 있다.

$$e_i = \frac{q_i}{p_i + q_i}, \quad i = 1, 2, \dots, n+1 \quad (3)$$

즉 고장율과 수리율을 이용한 작업장의 개별가용도에 의한 할당방법은 수리율의 경우와 마찬가지로  $e_i, e_{i+1}, \bar{e}_{i,i+1} = (e_i + e_{i+1})/2$  중에서 선택하여 이의 역수를 이용하여 비례적으로 완충재고용량을 배분할 수 있다.

### (3) 다구치의 안정성 설계 절차

다구치의 안정성 설계방법은 여러 현업분야에서 입증된 사례가 많다. 이 설계방법의 특징은 여러 가지 성능특성에 따른 기대손실을 최소화하기 위하여  $S/N$ 비를 최대화하는 설계변수를 찾는 방법으로, 다양한 환경하에서도 우수한 성능을 제공하는 제어인자의 수준을 결정할 수 있는 방법이다.

따라서 본 논문은 완충재고의 설치가 필요한 대상 자동흐름 라인의 설계시 완충재고용량의 할당방법을 제어인자로 하여 라인의 작업장수, 개별작업장의 가용도의 크기, 작업장별 고장율의 형태, 가공시간의 크기 및 형태를 잡음인자로 설정하여 이 잡음인자에 둔감한 완충재고용량의 할당방법을 찾고자

하는 것이다. 따라서 다구치의 안정성 설계방법을 도입하여 생산율의 최대화는 망대특성을 이용하고, 평균완충재고의 최소화는 망소특성을 이용한다. 안정성 설계의 일반적 절차는 다음과 같다(Phadke, 1989; Taguchi, 1993).

- ① 설계변수들로 이루어진 실험(직교배열)을 구성하고, 실험에 포함되는 제어인자와 잡음인자를 정한다.
- ② 제어인자를 할당하는 내측 직교배열, 잡음인자를 할당하는 외측 직교배열을 선택한다.
- ③ 내측 직교배열의 각 실험에서 반복 관측값으로부터  $S/N$ 비를 구한다.
- ④  $S/N$ 비에 의한 분산분석 등을 이용하여  $S/N$ 비에 영향을 미치는 제어변수를 찾는다.
- ⑤ ④에서 찾은 제어변수의 최적수준은  $S/N$ 비를 최대화하는 수준으로  $S/N$ 비에 영향을 미치지 않는 제어변수는 비용, 편리성 등을 고려하여 적절한 수준에 둔다.
- ⑥ 확인실험을 실시한다.

즉 위와 같이 안정성 설계를 위하여 잡음인자에 둔감하면서 우수한 성능측도를 제공하는 완충재고용량 할당방법을 다구치의 직적(product cross array)실험에 의하여 실험한 결과를  $S/N$ 비에 의한 자료분석방법을 이용하여 찾고자 한다.

성능측도는 생산율과 평균완충재고로 측정하며 성능평가 측도인  $S/N$ 비는  $i$ 번째 실험의  $j$ 번째 관측값이  $y_{ij}$ 일 경우 식 (4)에 의해서 구하며, 평균제곱편차(MSD)는 망대특성인 경우와 망소특성인 경우로 구분하여 식 (5)를 이용하여 구한다(Phadke, 1989; Taguchi, 1993).

$$S/N_i = -10 \log(MSD_i) \quad (4)$$

$$MSD_i = \begin{cases} \sum_{j=1}^m \frac{1}{m \cdot y_{ij}^2} & : \text{망대} \\ \sum_{j=1}^m y_{ij}^2 / m & : \text{망소} \end{cases} \quad (5)$$

여기서,  $m$ 은 자료수이다.

생산율과 평균완충재고에 대한  $S/N$ 비를 구한 후 분산분석을 실시하여 인자들의 성능측도에 대한 유의성을 파악하고 각 수준별 생산율과 평균완충재고의 평균에 대한  $S/N$ 비를 구하여 최적수준에 따른 완충재고용량의 할당방법을 추천한다.

## 3. 수치실험 및 분석

자동흐름라인의 안정성 설계를 위하여 Law(1981, 1983), Lin et al. (1994) 등은 동기화된 라인을 대상으로 개별 생산율 및 고장, 수리현상 등의 인자를 고려한 2수준 요인 또는 직교배열실험

을 적용하여 생산을 등에 유의한 인자만 파악하였지만, 본 논문은 자동흐름라인의 완충재고용량의 설계시 설계환경조건에 해당되는 잡음인자와 설계변수인 파라미터(제어인자)를 구분하여 완충재고용량의 할당에 직접 도움을 줄 수 있는 결과가 도출될 수 있는 실험을 실시하고자 한다. 즉 전체 시스템의 성능측도에 영향을 주는 제어인자는 완충재고용량의 할당방법(A)과 총 완충재고용량(B)으로 선택하고, 완충재고공간의 수(C), 작업장의 개별가용도의 평균(D), 작업장의 고장을 형태(E), 가공시간의 크기(F) 및 가공시간의 형태(G) 등을 잡음인자로 선택하였다. 먼저 제어인자 중 완충재고용량의 할당방법은 동일(UNI)한 형태, 단조증가(INC)형태, 단조감소(DEC)형태, 아래로 블록(VEX)한 형태 및 위로 블록(CAV)한 형태를 기본 5수준으로 정하고, 고장율과 수리율이 다른 경우에 수리율(REP)을 고려한 형태 및 작업장의 개별가용도(AVA)를 고려한 형태를 추가하여 7수준으로 설정하였다. 또한 총 완충재고용량은 생산율과 밀접한 관계를 가지지만 결정변수로 간주할 수 없으므로 이를 블록인자(blocking factor)로 설정하여 완충재고용량을 저(Low), 중(Mid), 고(High)의 3수준으로 설정하였다. 잡음인자 중 완충재고공간의 수(작업장의 수)는 작업장 사이에 모두 완충재고공간을 설치하는 경우로 3(4), 6(7) 및 9(10)개의 3수준으로 설정하였고, 작업장의 개별가용도의 평균은 80%, 90% 및 95%의 3수준으로 설정하였다. 작업장의 고장을 및 수리율은 실용적인 측면을 고려하여 가공시간( $\mu_i = 1$ )보다 한 단위 이상 적은 경우로 한정하였으며 작업장의 고장을 및 수리율이 동일한 경우에 <표 1>과 같이 설정하였다.

작업장의 고장을 및 수리율이 다른 경우는 고장과 수리의 형태가 단조증가형태를 기준으로 작업장의 개별가용도의 평균이 80%인 경우를 <표 2>에 예시하였으며, 작업장의 고장을

형태는 단조증가(INC), 단조감소(DEC), 아래로 블록(VEX) 및 위로 블록(CAV)형태의 4수준으로 설정하였다.

또한 가공시간은 한 사이클 타임을 1단위 시간의 기준으로 하였을 때 가공시간의 범위가  $\pm 30\%$  이내에 있다고 가정 [Dallery and Gershwin(1992)]도 기 설치된 라인에서 가공시간의 차이는 크지 않아야 한다고 기술함하고 이 경우 개별작업장의 (평균)가공시간의 평균을 기준으로 하여 가공시간의 변동 범위를  $100 \pm 10\%$ ,  $100 \pm 20\%$ ,  $100 \pm 30\%$ 의 3수준으로 설정하였으며 이 중 <표 3>에 단조증가형태를 예시하였다. 가공시간의 형태는 작업장별 가공시간의 패턴에 따라서 <표 3>을 이용하여 단조증가(INC), 단조감소(DEC), 아래로 블록(VEX) 및 위로 블록(CAV)형태의 4수준으로 설정하였다.

각 인자들의 전체 수준조합은 <표 4>와 같이 정리하였으며 각 실험조건에 적절한 인자 및 수준, 실험계획법을 선택하여 실험하였다.

적교배열을 이용한 내·외측 배열은 2개의 제어인자와 5개의 잡음인자를 이용하여 전체 시스템의 성능측도를 구하기 위하여 제어인자는 내측에 배열하고, 잡음인자는 외측에 배열하는 방법인 직적실험방법이 채택되었다. 내측배열은 2개의 제어인자를 3~7수준으로 정하여 2인자 요인실험으로서 선택하였고 2~5개의 잡음인자를 3~4수준으로 정하여 2인자 요인 실험 및  $L_{16}(4^5)$ 을 선택하였다.

시뮬레이션 프로그램은 한 작업장의 고장율, 수리율 및 가공시간을 모듈화하여 ARENA(Ver. 2.0)로 작성하였으며, 초기의 과도한 변동효과를 배제하기 위하여 5000~10,000 시뮬레이션 단위시간 동안 시험가동을 거친 후 10,000 단위시간 동안 시뮬레이션을 실시하였다.

시뮬레이션 설계의 실험 결과를 검증하기 위하여 자동흐름

표 1. 작업장별 고장율과 수리율이 동일한 경우

작업장의 개별 가용도	고장율	수리율
80%	0.0125	0.05
90%	0.005	0.05
95%	0.0026	0.05

표 2. 작업장별 고장율과 수리율

작업장의 수	고장율 수리율	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
		4	$p_i$	0.004	0.005	0.007	0.008				
	$q_i$	0.036	0.028	0.021	0.019						
7	$p_i$	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.008	0.008			
	$q_i$	0.036	0.028	0.028	0.024	0.024	0.019	0.019			
10	$p_i$	0.004	0.004	0.005	0.005	0.006	0.006	0.007	0.007	0.008	0.008
	$q_i$	0.036	0.036	0.028	0.028	0.024	0.024	0.021	0.021	0.019	0.019

표 3. 작업장별 가공시간의 패턴

범 위	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
100±10%	0.9	1	1	1.1						
100±20%	0.8	0.9	1.1	1.2						
100±30%	0.7	0.9	1.1	1.3						
100±10%	0.9	0.925	0.95	1	1.05	1.075	1.1			
100±20%	0.8	0.9	0.95	1	1.05	1.1	1.2			
100±30%	0.7	0.8	0.9	1	1.1	1.2	1.3			
100±10%	0.9	0.925	0.95	0.975	1	1	1.025	1.05	1.075	1.1
100±20%	0.8	0.85	0.9	0.95	0.975	1.025	1.05	1.1	1.15	1.2
100±30%	0.7	0.75	0.8	0.9	0.95	1.05	1.1	1.2	1.25	1.3

표 4. 시뮬레이션을 위한 각 인자들의 수준

제어인자		수 준			
A	완충재고 할당방법	UNI	INC	DEC	VEX CAV REP AVA
B	총 완충재고용량	Low		Mid	High
잠음인자		수 준			
C	완충재고공간 수	3		6	9
D	작업장의 개별 가용도의 평균	80		90	95
E	작업장별 고장율의 형태	INC	DEC	VEX	CAV
F	가공시간의 크기	100±10%		100±20%	100±30%
G	작업장별 가공시간의 크기 형태	INC	DEC	VEX	CAV

라인의 분해법(Choong and Gershwin, 1987; Dallery *et al.*, 1989)을 이용한 Fortran 프로그램을 작성하여 실험한 결과와 비교하였다. 3개의 작업장으로 이루어진 (평균)가공시간( $\mu_i$ )과 고장 및 수리시간이 지수분포를 따를 때  $p_i$ 와  $q_i$ 에 따른 자료와 결과는 <표 5>와 같다.

표 5. 시뮬레이션의 타당성 검토

입력자료					형태	결 과	
$i$	$\mu_i$	$p_i$	$q_i$	$b_i$		분해법	시뮬레이션
1	1	0.03	0.05	8	비동기화	0.4096	0.4078±0.006
2	1	0.04	0.06	8		0.3843	0.3891±0.006
3	1	0.03	0.05	-	확률적		

비동기화된 확정적인 라인 및 확률적인 라인의 시뮬레이션 결과는 95% 신뢰구간을 설정하여 분해법에 의한 인용값(Choong and Gershwin, 1987)과 비교하여 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하였다.

3.1 확률적인 라인

라인에서 가공시간의 평균, 고장 및 수리시간이 모두 지수 분포를 따르는 경우에 가공시간의 동일 여부, 고장율과 수리율이 각 작업장별로 동일한 경우와 동일하지 않은 경우로 구분하여 세 가지 경우에 대해서 실험하고자 한다.

(1) 모형의 가정

- ① 각 작업장의 가공시간, 고장 및 수리시간은 지수분포를 따르며, 각 작업장 사이의 작업물의 이송시간은 무시된다.
- ② 어느 한 작업장이 중단되어도 완충재고를 가지고 있는 작업장은 작업을 계속한다.
- ③ 첫번째 작업장은 부족되지 않으며 마지막 작업장은 봉쇄되지 않는다.
- ④ 모든 확률변수(가공시간, 고장 및 수리시간)는 독립이다.
- ⑤ 각 작업장의 고장은 작업종속고장(operation dependent failures)형태이다.
- ⑥ 각 작업장에 고장이 발생하면 모든 가공중인 작업물은 폐기되지 않고 작업장에 머물렀다가 작업장이 수리된 후에 재가공을 시작한다.
- (2) 확률적 가공시간, 고장율 및 수리율이 모두 동일한 경우 각 작업장의 가공시간, 고장 및 수리시간이 모두 지수분포

표 6. 제어인자(B)의 수준

완충재고 공간 수	총 완충 재고용량	Low	Mid	High
	3	6	12	18
6	24	48	72	
9	45	90	135	

표 7. 각 인자들의 수준 조합

인자	기호	항 목	수 준				
제어인자	A	완충재고 할당방법	UNI	INC	DEC	VEX	CAV
	B	총 완충재고용량	Low	Mid	High		
잡음인자	C	완충재고공간 수	4	7	10		
	D	작업장의 개별 가용도의 평균	80	90	95		

를 따르면서 동일한 경우에 2개의 제어인자와 2개의 잡음인자가 선정되었으며, 제어인자 B는 <표 6>과 같이 설정하였다.

잡음인자와 제어인자의 각 수준은 <표 7>을 이용하여 내측 배열과 외측배열 모두 2인자 요인실험을 선택하였으며, 완충재고할당방법에서 수리율을 고려한 경우와 개별가용도를 고려한 경우는 수리율과 고장율이 동일한 경우와 같으므로 5수준으로 설정하였다.

표 8. 생산율에 대한 직적실험의 설계 및 실험결과

Inner array		Outer Array									No.	C	D 평균	S/N비
		1	2	3	4	5	6	7	8	9				
No.	A B	1	2	3	1	2	3	1	2	3	D	평균	S/N비	
1	1 1	1	1	1	2	2	2	3	3	3	0.5148	-6.3092		
2	1 2										0.5756	-5.1712		
3	1 3										0.6122	-4.5701		
4	2 1										0.4971	-6.4114		
5	2 2										0.5410	-5.7128		
6	2 3										0.5426	-5.6278		
7	3 1										0.4846	-6.6986		
8	3 2										0.5437	-5.5498		
9	3 3										0.5464	-5.6450		
10	4 1										0.4785	-6.9924		
11	4 2										0.5309	-6.0070		
12	4 3										0.5393	-5.7725		
13	5 1										0.4992	-6.4696		
14	5 2										0.5569	-5.4671		
15	5 3										0.5707	-5.0950		

<표 8>에 설계변수인 인자 A의 평균 생산율과 이의 S/N비를 예시하여 정리하였다.

생산율에 대한 실험결과의 분산분석표는 <표 9>와 같고 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였다.

평균완충재고에 관한 직적실험에 대한 실험결과와 분산분석에서 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였으며, 할당방법에 대한 최적수준을 찾기 위하여 인자 A의 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균을 <표 10>에 정리하였

으며, 각 수준별 S/N비를 <그림 2>에 도시하였다.

완충재고용량의 할당방법에 대한 인자 A의 최적수준은 생산율 측면에서는 수준 1을, 평균완충재고는 수준 2를 안정성 설계를 위한 할당방법으로 추천할 수 있다.

(3) 확률적 가공시간으로 동일하고 고장을 맞 수리율이 다른 경우

가공시간이 지수분포를 따르면서 동일하고, 고장 및 수리시간이 지수분포를 따르면서 다른 경우의 실험계획은 제어인자

표 9. 생산율의 S/N비에 대한 분산분석

인자	제곱합	자유도	제곱 평균	F-비	F 기각치
인자 A	1.3856	4	0.3464	8.97	7.01
인자 B	4.2831	2	2.1415	55.45	8.65
잔차	0.3090	8	0.0386		
계	5.9777	14			

표 10. 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균

인자 A	생산율		평균완충재고	
	평균	S/N비의 평균	평균	S/N비의 평균
수준 1	0.5675	-5.3501	25.9871	-28.8852
수준 2	0.5269	-5.9173	12.2113	-22.6177
수준 3	0.5249	-5.9645	38.4399	-32.2011
수준 4	0.5163	-6.2573	25.1388	-28.6630
수준 5	0.5423	-5.6772	24.6882	-28.6641

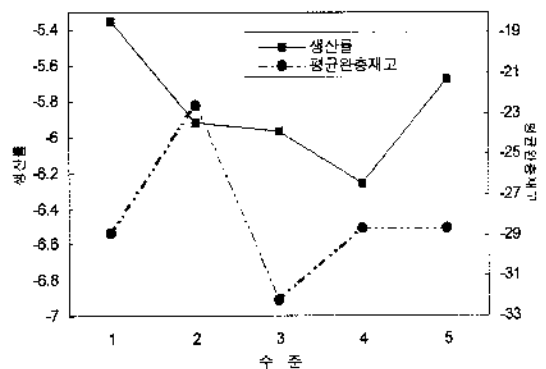


그림 2. 인자 A의 수준별 S/N비.

표 11. 각 인자들의 수준

인자	기호	항 목	수 준						
제어인자	A	완충재고 할당방법	UNI	INC	DEC	VEX	CAV	REP	AVA
	B	총 완충재고용량	Low		Mid		High		
잡음인자	C	완충재고공간 수	3		6		9		
	D	작업장의 개별 가용도의 평균	80		90		95		
	E	고장율의 형태	INC		DEC		VEX		CAV

(A)의 경우에 수리율의 크기를 고려한 할당방법(REP)과 작업장의 개별 가용도를 대상으로 한 할당방법(AVA)을 추가하기 위하여 예비실험을 통하여  $\bar{q}_{i,i+1}$  과  $\bar{e}_{i,i+1}$  을 이용한 할당방법이 선택되어 7수준으로 설정하였고, 잡음인자는 각 작업장의 고장율과 수리율이 동일하지 않으므로 작업장의 고장율 형태(E)를 4수준으로 설정하여 추가하였다.

제어인자와 잡음인자의 수준을 <표 11>과 같이 설정한 직적실험에서 내측배열은 2인자 요인실험을 선택하였고 외측배열은  $L_{16}(4^3)$ 을 선택하여 유의수준법을 이용하여 실험하였다.

생산율에 관한 실험결과와 분산분석에서 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였으며, 그 결과는 <표 12>와 같다.

표 12. 생산율의 S/N비에 의한 분산분석

인자	제공합	자유도	제공평균	F-비	F 기각치
인자 A	1.5475	6	0.2579	8.99	4.82
인자 B	5.4915	2	2.7457	95.66	6.93
잔차	0.3444	12	0.0287		
계	7.3834	20			

표 13. 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균

인자 A	생산율		평균완충재고	
	평균	S/N비의 평균	평균	S/N비의 평균
수준 1	0.5280	-6.0249	24.0362	-40.6309
수준 2	0.4950	-6.6777	13.5364	-35.8072
수준 3	0.4996	-6.5125	35.8731	-43.4745
수준 4	0.4857	-6.8123	24.9957	-40.4455
수준 5	0.5057	-6.3261	25.0360	-40.9248
수준 6	0.5127	-6.2529	25.3635	-40.9666
수준 7	0.5249	-6.1008	24.6914	-40.5207

평균완충재고에 대한 실험결과와 분산분석에서 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였으며, 할당방법에 대한 최적수준을 찾기 위하여 인자 A의 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균을 <표 13>에 정리하였으며, 각 수준별 S/N비를 <그림 3>에 도시하였다.

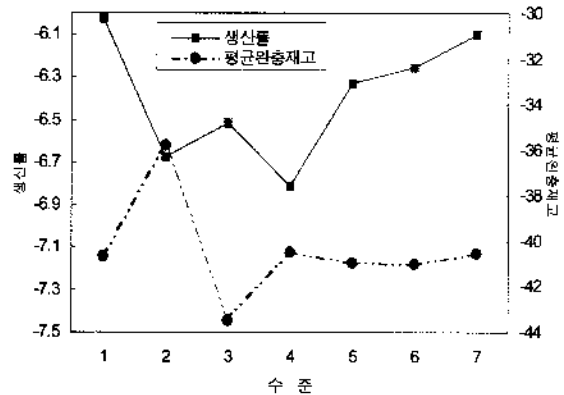


그림 3. 인자 A의 수준별 S/N비.

완충재고용량의 할당방법에 대한 인자 A의 최적수준은 생산을 측면에서는 수준 1과 7의 순서로, 평균완충재고는 수준 2를 안정성 설계를 위한 할당방법으로 추천할 수 있다.

(4) 확률적 가공시간, 고장율 및 수리율이 모두 다른 경우 가공시간, 고장 및 수리시간이 지수분포를 따르면서 모두 다른 경우의 수치실험은 <표 4>와 같이 설정하였고, 제어인자 (A)의 수준 중에서 수리율의 크기를 고려한 할당방법(REP)은  $\bar{q}_{i,i+1}$ 와 작업장 개별가용도의 수준을 고려한 할당방법(AVA)은 예비실험을 통하여  $e_{i,i+1}$ 이 선택되었다. 잡음인자 중 가공시간이 다른 경우로 가공시간의 크기와 작업장별 가공시간의 크기에 따른 형태를 추가하여 실험하였다.

생산율에 관한 실험결과와 분산분석에서 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였으며 그 결과는 <표 14>와 같다.

표 14. 생산율의 S/N비에 의한 분산분석

인자	제공합	자유도	제공평균	F-비	F 기각치
인자 A	1.1946	6	0.1991	5.56	4.82
인자 B	3.9559	2	1.9779	55.20	6.93
잔차	0.4300	12	0.0358		
계	5.5805	20			

평균완충재고에 대한 실험결과와 분산분석에서 제어인자 (A)는 유의수준 0.01에서 유의하였으며, 할당방법에 대한 최적

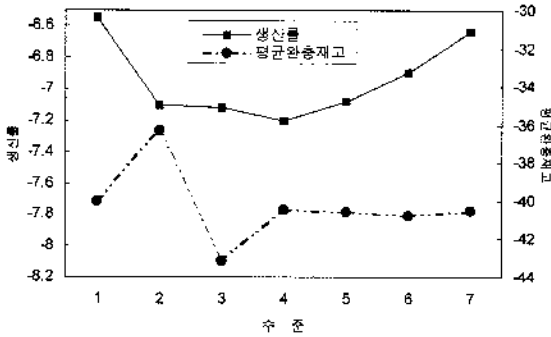


그림 4. 인자 A의 수준별 S/N비.

표 15. 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균

인자 A	생산율		평균완충재고	
	평균	S/N비의 평균	평균	S/N비의 평균
수준 1	0.4952	-6.5418	23.1470	-40.0314
수준 2	0.4665	-7.1033	13.7717	-36.2700
수준 3	0.4698	-7.1189	33.9180	-43.1135
수준 4	0.4603	-7.1975	24.7947	-40.4272
수준 5	0.4666	-7.0791	23.8760	-40.5894
수준 6	0.4777	-6.8962	24.3905	-40.7595
수준 7	0.4895	-6.6344	24.3447	-40.5028

수준을 찾기 위하여 인자 A의 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균을 <표 15>에 정리하였고, 각 수준별 S/N비를 <그림 4>에 도시하였다.

완충재고용량의 할당방법에 대한 인자 A의 최적 수준은 생산을 측면에서는 수준 1과 7의 순서로, 평균완충재고는 수준 2를 안정성 설계를 위한 할당방법으로 추천할 수 있다.

### 3.2 비동기화된 확정적 가공시간을 가지는 라인

자동흐름라인에서 가공시간이 동기화되지 않고, 각 작업장별로 고장과 수리가 독립적으로 이루어지는 비동기화된 라인으로 가공시간은 확정적이고 고장 및 수리시간이 지수분포를 따를 때의 수치실험 및 분석을 하고자 한다.

#### (1) 모형의 가정

- ① 각 작업장의 가공시간은 확정적이고, 고장시간과 수리시간은 지수분포를 따르며, 각 작업장 사이의 작업물의 이송시간은 무시된다.
- ② 3.1절의 확률적인 모형의 가정 ②~⑥과 동일하다.

(2) 확정적 가공시간, 고장율 및 수리율이 모두 동일한 경우 비동기화된 확정적인 가공시간을 가지는 경우의 첫번째 실험

험은 각 작업장의 가공시간은 확정적이면서 동일하고, 고장 및 수리시간이 지수분포를 따르면서 동일한 경우의 실험은 2개의 제어인자와 2개의 잠음인자를 고려하였다. 제어인자 B는 <표 6>을 이용하고, 각 인자들의 수준 조합은 <표 7>을 이용한 실험에서 인자 A의 최적 수준은 생산을 측면에서는 위로 불록하게 할당하는 방법인 수준 5가 가장 우수하였고 다음으로 동일하게 할당하는 방법인 수준 1이, 평균완충재고는 수준 2가 추천될 수 있다.

#### (3) 확정적 가공시간으로 고장을 및 수리율이 다른 경우

비동기화된 라인의 두번째 경우로서, 가공시간은 확정적이면서 동일하고 고장과 수리시간은 지수분포를 따르면서 서로 다른 경우로 실험방법은 앞 절의 확률적 가공시간의 평균이 동일하고 고장율과 수리율이 다른 경우와 같게 제어인자와 잠음인자를 설정하였다.

먼저 제어인자(A)에서 수리율의 크기를 고려한 할당방법(REP)과 작업장 개별생산율의 수준을 고려한 할당방법(AVA)에 대한 예비실험에서 가장 우수한 결과를 제공하는  $q_{i+1}$ ,  $\bar{e}_{i,i+1}$ 이 각각 할당 기준값으로 선택되었다. 제어인자와 잠음인자의 수준을 <표 11>과 같이 설정한 직적실험에서 인자 A의 최적수준은 생산을 측면에서는 위로 불록하게 할당하는 방법인 수준 5가 가장 우수하였고, 평균완충재고는 수준 2가 우수하였다.

#### (4) 확정적 가공시간, 고장율 및 수리율이 모두 다른 경우

가공시간이 확정적이면서 다르고, 고장시간과 수리시간이 지수분포를 따르면서 다른 경우의 실험은 제어인자와 잠음인자의 수준을 <표 4>와 같이 설정하고 제어인자 중 수리율의 크기를 고려한 할당방법(REP)과 작업장의 개별가용도의 수준을 고려한 할당방법(AVA)은 예비실험을 통하여 가장 우수한 결과를 제공하는  $q_{i,i+1}$ ,  $\bar{e}_{i,i+1}$ 이 각각 할당 기준값으로 선택되었으며 총 완충재고용량(B)은 3수준으로 <표 6>을 이용하였다.

실험결과 생산율에 대한 S/N비의 분산분석은 <표 16>과 같으며 제어인자 A는 유의수준 0.05에서 통계적으로 유의하지 않았지만, 다구치(Taguchi, 1993)는 F-비가 2 이상이면 실용적인 측면에서 유의하다고 판정하고 있으므로 S/N비의 최대값을 보

표 16. 생산율의 S/N비에 의한 분산분석

인자	제공합	자유도	제공평균	F-비	F 기각치
인자 A	0.1557	6	0.0260	2.0073	3.00
인자 B	2.8367	2	1.4183	109.708	3.89
잔차	0.1551	12	0.0129		
계	3.1475	20			



여주는 수준을 추천하고자 한다. 그리고 평균완충재고에 대한 실험의 분산분석에서 제어인자 A는 유의수준 0.01에서 유의하였다.

인자 A의 최적수준을 찾기 위하여 생산율과 평균완충재고에 대한 평균과 S/N비의 평균은 <표 17>에 정리하였으며, 각 수준별 S/N비를 <그림 5>에 도시하였다.

표 17. 생산율의 S/N비의 평균과 평균완충재고의 평균과 S/N비의 평균

인자 A	생산율		평균완충재고	
	평균	S/N비의 평균	평균	S/N비의 평균
수준 1	0.5524	-5.6974	25.5032	-29.1898
수준 2	0.5445	-5.9168	18.0656	-26.9979
수준 3	0.5455	-5.8219	32.9169	-31.0126
수준 4	0.5454	-5.8465	25.2405	-28.8493
수준 5	0.5503	-5.6957	25.2424	-29.2637
수준 6	0.5413	-5.9240	25.4403	-29.1307
수준 7	0.5480	-5.7906	26.9722	-29.4583

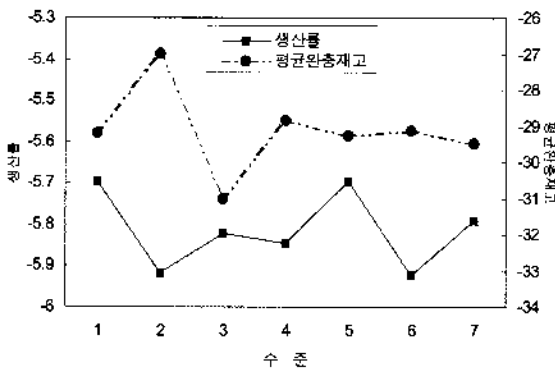


그림 5. 인자 A의 수준별 S/N비.

따라서 인자 A의 최적 수준은 생산율 측면에서는 최대의 S/N비를 가지는 수준 5와 수준 1을 추천할 수 있고, 평균완충재고는 수준 2를 안정성 설계를 위한 할당방법으로 추천할 수 있다.

지금까지 실험한 결과를 요약하면 확률적인 라인의 완충재고용량의 할당방법은 생산율 측면에서는 동일(UNI)하게 할당하는 방법이 우수하였으며, 비동기화된 확정적 가공시간을 가지는 라인의 할당방법은 위로 블록(CAV)하게 할당하는 방법이 가장 우수하였다. 그리고 평균완충재고에 대한 실험에서 완충재고용량의 할당방법은 설계조건에 관계없이 단조증가(INC) 형태의 할당방법이 우수하였다.

따라서, 자동흐름라인의 설계조건에 둔감한 완충재고용량의 할당은 생산율이 평가기준일 경우는 대상라인의 조건에 따라서 동일한 할당 또는 위로 블록하게 할당하는 형태로 설계하고, 평균완충재고가 중요한 평가속도가 되면 단조증가 형태의 할당방법에 의해서 설계할 수 있을 것이다.

#### 4. 완충재고용량 할당을 위한 안정성 설계절차

앞 절의 수치실험결과에서 얻은 간략한 규칙을 기초로 안정성 설계절차를 제시하고자 한다. 다구치의 안정성 설계방법은 적은 비용으로 주어진 환경에서 잡음인자에 둔감하도록 설계하는 것이 목적이다. 따라서 이 절에서는 완충재고공간의 수, 작업장의 개별가용도의 평균, 고장율의 형태, 가공시간의 크기 및 가공시간의 형태 등에 둔감한 완충재고용량의 할당방법을 이용하여 확률적 라인과 비동기화된 확정적 가공시간을 가지는 라인의 설계를 실시하고자 한다.

##### 4.1 안정성 설계 절차

(단계 1) 각 작업장의 (평균)가공시간, 고장율 및 수리율에 관한 정보를 취합하고 목표생산율을 구한다.

(단계 2) (평균)가공시간이 동일하지 않고, 고장시간과 수리시간이 지수분포를 따르는 경우는 동일한 가공시간을 가지는 라인과 대응할 수 있도록 고장율과 수리율을 변환한다. 즉 가공시간이 작업장별로 서로 다른 작업장들로 구성된 라인은 각 작업장 중에서 가공시간이 가장 빠른 작업장을 선택한다. 즉  $\mu$ 는 식 (6)을 이용하여 구한다.

$$\mu = \min(\mu_1, \dots, \mu_i) \tag{6}$$

고장시간과 수리시간이 지수분포를 따르는 경우에는 Dallery *et al.*(1989)의 비동질적(nonhomogeneous) 라인을 동질적(homogeneous) 라인으로 변환하는 방법을 이용하면, 작업장  $M_i$ 의  $p_i$ 와  $q_i$ 를 같은 가공시간을 가지는 작업장의  $p_i^{(e)}$ 와  $q_i^{(e)}$ 로 바꾸어 동질적 라인으로 변환한다.  $e_i$ 는 원래 작업장의 개별가용도이며  $e_i^{(e)}$ 는 동일한 가공시간하의 변환된 작업장의 개별가용도로 식(7)의 관계를 이용한다.

$$e_i = \frac{1}{\mu_i} \frac{q_i}{p_i + q_i}$$

$$e_i^{(e)} = \frac{1}{\mu_i} \frac{q_i^{(e)}}{p_i^{(e)} + q_i^{(e)}} \tag{7}$$

따라서 같은 가공시간을 가지는 개별가용도를 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{q_i^{(e)}}{p_i^{(e)} + q_i^{(e)}} = \frac{\mu}{\mu_i} \frac{q_i}{p_i + q_i} \tag{8}$$

만일, 수리율이 식 (9)와 같다고 가정하여 고장율을

식 (10)과 같이 구한다.

$$q_i^{(e)} = q_i \quad (9)$$

$$p_i^{(e)} = p_i + \frac{\mu_i - \mu}{\mu} (p_i + q_i) \quad (10)$$

(단계 3) 고장시간과 수리시간이 지수분포를 따르는 경우에 필요한 완충재고의 총 용량을 산출하기 위하여 Dallery and Gershwin(1992)에 정의된 MTS(Multiple Time Scale)가 만족되는 경우가 일반적이므로 (단계 2)에서 설정된 가공시간에 의해서 기하분포로 변환하여 고장확률( $f_i$ )과 수리확률( $r_i$ )을 근사적으로 결정한다. 가공시간이 확정적이면 (단계 4)로 가고 가공시간이 확률적일 경우는 (단계 5)로 간다.

(단계 4) 대상 라인의 달성하고자 하는 생산물에 필요한 총 완충재고용량을 다음과 같이 개략적으로 결정한다. 완충재고용량과 생산물에 관한 정확한 공식은 유도되어 있지 않지만 각 작업장의 고장확률을 최적할 당할 수 있는 경우에 Buzacott and Shanthikumar (1993)에 의해서 제시된 식 (11)을 이용하여 예측 생산율( $\eta^0$ )과 총 완충재고용량( $B$ )의 개략값을 결정한다.

$$\eta(B) = \frac{1}{1 + \frac{A}{r} \cdot \frac{Br + n(4-2r)}{(n+1)Br + n(4-2r)}} \quad (11)$$

단,  $r_i = r, \quad i = 1, \dots, n+1$

$$A = \sum_{i=1}^n f_i$$

총 완충재고용량( $B$ )의 개략값이 결정되면 (단계 6)으로 간다.

(단계 5) 확률적 라인에 필요한 총 용량을 예비적으로 설정하기 위해 식 (11)을 이용하기 위하여 (단계 3)에서 구한  $f_i$ 와  $r_i$ 에 의해 총 완충재고용량을 구한다. 그리고 Blumenfeld (1990)의 모든 작업장이 완벽(reliable)한 작업장들로 이루어져 있을 때 생산율을 구할 수 있는 식 (12)를 이용하여 완충재고 총 용량을 구하고 식 (11)과 비교하여 큰 값을 총 용량의 개략값으로 택하여 (단계 6)으로 간다.

$$\eta = \frac{1}{\mu \left\{ 1 + \frac{1.67(n-1)cv_T}{1+n+0.31cv_T+1.67nB/(2cv_T)} \right\}} \quad (12)$$

여기서,  $\mu_i = \mu, \quad i = 1, \dots, n+1, \quad cv_T$ 는 가공시간의 변동계수

(단계 6) [i] 확률적인 라인은 생산물의 측면에서는 동일한 형태로 할당하며, 평균완충재고가 매우 중요한 측도가 되는 경우는 단조증가형태로 할당하고 (단계 7)로 간다.

[ii] 비동기화된 확정적 가공시간을 가지는 경우는 위로 볼록하게 할당하고 (단계 7)로 간다. 평균완충재고가 매우 중요한 측도가 되는 경우는 단조증가형태로 할당한다.

(단계 7) 시뮬레이션(또는 분해법)을 실시하여 예측 생산율을 구한다.

(단계 8) 각 작업장의 완충재고용량에 의하여 선형일 경우와 규모의 경제를 고려한 식 (13)(화학공장의 설비투자비를 개략적으로 결정할 때 활용됨)을 이용하여 완충재고공간의 투자비를 구할 수 있다.

$$C(B) = KB^\alpha, \quad (0 < \alpha \leq 1) \quad (13)$$

단,  $K$ 는 1단위 용량을 가진 완충재고공간의 설치비용

(단계 9) 예측 생산율과 완충재고공간의 설치비용을 고려해서 적절한 경우이면 끝내고 그렇지 않으면  $B$ 를 변화시켜 (단계 6)으로 간다.

#### 4.2 확률적인 라인

확률적인 가공시간과 고장 및 수리시간이 모두 지수분포를 따르면서 동일하지 않은 경우의 안정성 설계는 먼저 (단계 2)에서 가공시간을 동일한 라인으로 변환하며 (단계 5)의 식(11)과 식(12)로부터 구한  $B$  중에서 큰 값을 필요한 완충재고 총 용량의 초기값으로 활용한다. 즉 <표 18>과 같이 7개의 작업장으로 이루어진 평균가공시간의 크가  $100 \pm 10\%$ 의 자료는 가공시간이 다른 경우로 가공시간의 평균을 확정적인 가공시간으로 간주하여 식 (6)에 의해서 최소가공시간을 결정하면  $\mu = 0.9$ 가 된다.

이때 <표 18>을 (단계 2)에 의해서 변환하면 고장확률과 수

표 18. 7개의 작업장으로 이루어진 비동기화된 라인의 예

가공시간( $\mu_i$ )	0.9	1	1.05	1.1	1.075	0.95	0.925
고장율( $p_i$ )	0.008	0.006	0.005	0.004	0.005	0.006	0.008
수리율( $q_i$ )	0.019	0.024	0.028	0.036	0.028	0.024	0.019

표 19. 비동기화된 라인의 동기화된 라인으로의 근사

고장확률( $f_i$ )	0.004	0.005	0.006	0.008	0.010	0.012	0.013
수리확률( $r_i$ )	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023	0.023

리확률은 <표 19>와 같다.

다음으로 (단계 4)에서 <표 19>의 고장확률과 수리확률을 이용하여 설정된 목표생산율 50%를 달성하기 위한 총 완충재 고용량  $B$ 의 개략값은 174가 선택되었다.

완충재고용량의 할당방법은 (단계 6)의 [i]에 의해서 동일한 형태가 우수하므로 완충재고용량을 29-29-29-29-29-29의 값을 배정하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 예측생산율(평균완충재고)을 구하면 0.47391(84.89)를 얻는다. 목표생산율이 50%인데 47%로 떨어지므로 50%의 수준으로 높이기 위해서는 총 완충재고용량( $B$ )을 210으로 증가시켜 예측생산율(평균완충재고)을 구하면 0.50046(99.42)을 얻는다.

다음으로 (단계 8)에서 식 (13)을 이용하여  $\alpha=0.8$ 이라고 할 경우에 투자비를 계산하여  $B=174$ 인 경우에 이 비용을 1로 두면,  $C(210)=1.16$ 배가 되므로 완충재고공간의 투자비용과 생산율(평균완충재고)을 고려하여 적절한 대안을 선택하고 그렇지 않으면 완충재고를 변화시켜 (단계 6)으로 간다.

본 실험의 타당성을 검토하기 위하여 Jafari and Shanthikumar (1989)의 동기화된 라인을 대상으로 근사해를 구하는 동적 계획법을 활용하여 확률적인 라인 및 비동기화된 라인의 완충재 고용량을 할당하는 FORTRAN 프로그램을 작성하고 이를 이용한 결과를 본 논문의 완충재고용량의 할당 절차에 따른 생산율과 비교하였다. 즉 총 완충재고용량이  $B=210$ 인 경우에 적용하였는데, 생산율(평균완충재고)은 0.53310(93.13)으로 완충재고용량의 할당은 45-17-9-11-22-106으로 나타나 본 논문의 설계방법보다 약간 우수하였다.

#### 4.3 확정적 비동기화된 가공시간을 가지는 라인

가공시간이 확정적이고 고장율 및 수리율이 모두 다른 경우의 안정성 설계는 <표 18>의 작업장의 수가 7개로 이루어진 라인을 대상으로 각 작업장의 확정적 가공시간에 의해서 동결적인 라인으로 변환된 <표 19>에 의해서 총 완충재고용량을 구하면  $B=174$ 가 된다.

완충재고용량의 할당방법은 (단계 6)의 [ii]에서 위로 블록한 형태가 우수하므로 완충재고용량을 13-26-48-48-26-13으로 배정하여 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 예측생산율(평균완충재고)을 구하면 0.52654(101.52)의 원하는 목표생산율을 얻는다. 만일 목표생산율을 달성할 수 없을 때는 총 완충재고용량을 증가시켜 투자비용과 생산율(평균완충재고)을 고려하여 적절한 대안을 선택한다.

본 논문에서 제시된 방법의 타당성 검토를 위하여  $B=174$ 인

경우에 동적계획법을 적용한 결과의 생산율(평균완충재고)은 0.49858(103.00)이며 완충재고용량의 할당은 38-38-31-32-20-15로 나타나 본 논문의 결과가 조금 우수하였다.

두 수치 예를 대상으로 비교하면 생산율 측면에서 동적계획법의 해에 대한 제시된 절차의 생산율의 비는 94%~106%로 거의 근접하거나 우수한 결과를 보여주고 있으므로 적용 용이성을 고려하면 제시된 방법의 상대적 우월성을 파악할 수 있다(광범위한 수치실험의 결과도 두 절차의 해가 근접함을 보여주고 있음).

## 5. 결 론

현재까지의 자동흐름라인에 대한 대부분의 연구들은 라인의 구조와 작업장의 신뢰도에 따른 생산율 평가 및 완충재고 설치에 따른 영향, 라인에서의 완충재고공간의 위치 및 용량과 생산율 등에 대한 관계규명을 위해 노력해 왔지만 실제의 라인설계에 이용하기 위해서는 별도의 복잡한 분석과정이 선행되어야 한다. 즉 작업장이 3개 이상이 되면 생산율의 정확한 계산은 현실적으로 매우 어려우므로 분해법이나 시뮬레이션 방법을 이용해야 되는데, 라인의 설계시 목표생산율을 달성할 수 있도록 완충재고공간의 용량을 결정하고 이를 할당하는 것은 어려운 문제이다. 따라서 라인의 설계시 각 용량을 결정하기 위해서 적용이 용이하고 간략한 규칙을 가지며, 다양한 설계조건에서 비교적 우수한 완충재고용량 할당방법을 이용한 체계적 절차가 제시됨으로써 복잡한 과정을 거치지 않아도 라인설계에 쉽게 활용할 수 있다.

따라서 본 연구는 동기화된 라인(서순근 등, 1998)을 바탕으로 확률적인 라인 및 비동기화된 확정적인 가공시간을 가지는 라인을 고려함으로써 자동흐름라인의 전반적인 유형을 대상으로 작업장의 수, 작업장의 가공시간, 고장율과 수리율, 가용도 등 여러 가지 설계조건에 대해서 다구치의 실험계획 및 분석방법을 도입하고 시뮬레이션을 통한 수치실험을 실시하여 다양한 상황에서도 우수한 해를 제공하는 간략한 규칙을 가진 완충재고용량에 대한 할당방법을 찾았다. 생산율에 관한 수치실험 및 분석결과를 요약하면 첫 번째 확률적인 라인은 완충재고용량 할당방법을 동일(UNI)하게 할당하는 방법이 우수하였으며, 두 번째 비동기화된 라인의 완충재고용량 할당방법은 위로 블록(CAV)하게 할당하는 방법이 우수하였으며, 세 번째 확정적인 가공시간을 가지면서 동기화된 라인의 생산율의 실험에서 완충재고용량 할당방법을 위로 블록(CAV)하게 할당하는 방법이 우수하였다(서순근 등, 1998). 그러나 평균완충재고 측면에서는 완충재고용량 할당방법을 라인의 형태에 관계없이 단조증가하게 할당(INC)하는 방법이 우수하였다.

그리고 본 연구는 안정성 설계에서 추천된 간략한 규칙과 완충재고공간의 투자비용을 고려하여 각 완충재고의 용량을 할당하는 체계적인 절차를 제시하고 수치 예에 적용하였다.

또한 제시된 절차의 타당성 검토를 위하여 동기화된 라인의 최적 완충재고용량을 결정하는 근사적 해법인 Jafari and Shanthi-kumar(1989)의 동적계획법을 이용하여 확률적인 라인 및 비동기화된 라인에 적용할 수 있는 FORTRAN 프로그램을 작성하였으며, 수치 예를 중심으로 제시된 완충재고용량의 할당절차에 의한 생산율과 동적 계획법에 의한 생산율과 비교하여 본 절차의 유용성을 입증하였다. 그러나 본 논문에서 제시된 방법이 최적해가 아니므로, 근사해를 도출하지만 최적화 방법인 동적계획법을 이용하는 Jafari and Shanthikumar (1989)의 동적계획법 결과와 비교하여 근접하는 결과를 보여주고 있음을 파악하였다. 따라서 본 논문의 방법이 적용이 용이하므로 동적계획법을 이용한 절차보다 활용도가 높을 것으로 기대한다.

따라서 본 연구에서 제시된 간략한 규칙을 이용하여 보다 쉽게 자동흐름라인의 설계에 활용할 수 있으며, 또한 추천된 완충재고용량 규칙은 라인설계시 초기해가 필요한 절차(예, 탐색법)에 초기해로 이용할 수 있고, 제시된 안정성 설계방법은 다양한 생산라인의 설계시에도 유용하게 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

**참고문헌**

서순근, 정원기(1998), 자동흐름라인의 안정성 설계, *대한설비관리학회지*, 3(1), 159-177.  
 Altiock, T. and Stridham, S. (1983), The allocation of interstage buffer capacities in production lines, *IIE Transactions*, 15, 292-299.  
 Blumenfeld, D. E. (1990), A simple formula for estimating throughput of serial production lines with variable processing times and limited buffer capacity, *International Journal of Production Research*, 28, 1163-1182.  
 Buzacott, J. A. (1967), Automatic transfer lines with buffer stocks, *International Journal of Production Research*, 5, 182-200.  
 Buzacott, J. A. and Shanthikumar, J. G. (1993), *Stochastic Models of Manufacturing Systems*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.  
 Choong, Y. F. and Gershwin, S. B. (1987), A decomposition method for the approximate evaluation of capacitated transfer lines with unreliable machines and random processing times, *IIE Transactions*, 19, 150-159.  
 Chow, W. (1987), Buffer capacity analysis for sequential production lines with

variable process times, *International Journal of Production Research*, 25, 1183-1196.  
 Conway, R. W., Maxwell, W.L., McClain, J. O. and Tomas, L. J. (1988), The role of work-in-process inventories in series production lines, *Operations Research*, 36, 229-241.  
 Dallery, Y. and Gershwin, S. B. (1992), Manufacturing flow line systems : A review of models and analytical results, *Queueing Systems*, 12, 3-94.  
 Dallery, Y., David, R. and Xie, X. (1988), An efficient algorithm for analysis of transfer lines with unreliable machines and finite buffers, *IIE Transactions*, 20, 280-283.  
 Dallery, Y., David, R. and Xie, X. (1989), Approximate analysis of transfer lines with unreliable machines and finite buffers, *IEEE Transaction on Automatic Control*, 34, 943-953.  
 Gershwin, S. B. and Berman, O. (1981), Analysis of transfer lines consisting of two unreliable machines with random processing times and finite and finite storage buffers, *AIIE Transactions*, 13, 2-11.  
 Hillier, F. S. and So, K. C. (1991), The effect of the coefficient of variation of operation times on the allocation of storage space in production line systems, *IIE Transactions*, 23, 198-202.  
 Jafari, M. A. and Shanthikumar, J. G. (1989), Determination of optimal buffer storage capacities and optimal allocation in multistage automatic transfer lines, *IIE Transactions*, 21, 130-135.  
 Law, S. S. (1981), A statistical analysis of system parameters in automatic transfer lines, *International Journal of Production Research*, 19, 709-724.  
 Law, S. S. (1983), A factorial analysis of automatic transfer line systems, *International Journal of Production Research*, 21, 827-834.  
 Lin, C., Madu, C. N. and Huei, C. (1994), Experimental design and regression analysis in simulation : An automated flowline case study, *Microelectron. Reliab.*, 34(5), 845-861.  
 Masso, J. and Smith, M. L. (1974), Interstage storages for the three stage lines subject to stochastic failures, *AIIE Transactions*, 6, 354-358.  
 Park, T. (1993), A two-phase heuristic algorithm for determining buffer sizes of production lines, *International Journal of Production Research*, 31, 613-631.  
 Phadke, M. V. (1989), *Quality Engineering Using Robust Design*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs.  
 Powell, S. G. (1994), Buffer allocation in unbalanced three-station serial lines, *International Journal of Production Research*, 32, 2201-2217.  
 Sheskin, T. J. (1976), Allocation of interstage storage along an automatic transfer line, *AIIE Transaction*, 8, 146-152.  
 So, K. T. (1997), Optimal buffer allocation strategy for minimizing work-in-process inventory in unpaced production lines, *IIE Transactions*, 29, 81-88.  
 Taguchi, G. (1993), Taguchi method : Design of experiments, *American Supplier Institute*, Dearborn.

**서순근**

서울대학교 공과대학 산업공학과 학사  
 한국과학기술원 산업공학과 석사  
 한국과학기술원 산업공학과 박사  
 현재: 동아대학교 공과대학 산업시스템공학과 교수  
 관심 분야: 신뢰성공학 및 품질공학, 생산체계의 확률적 모형화 및 최적화

**정원기**

청주대학교 산업공학과 학사  
 동아대학교 산업공학과 석사  
 동아대학교 산업공학과 박사  
 현재: 한국가스안전공사 울산지역본부계직  
 관심 분야: 생산체계의 모형화 및 최적화, 시스템 안전체계