

다구치 방법에 의한 자동흐름라인 시스템의 안정설계

A Robust Design of Automatic Transfer Line System using Taguchi's Method

김 홍준*
Hong-Jun Kim
양 정문**
Jung-Mun Yang
송 서일**
Suh-ill Song

Abstract

An automatic transfer line consists of several stages(groups of stations) in series into one system by a common transfer mechanism and a common control system. In this system losses of the efficiency are evidenced in periods where a stage is forced down - starved or blocked. The efficiency of an automatic transfer line can be improved by providing buffer storages between a stage or the length of line. In common senses there are several critical factors, system configurations relative position, and buffer capacity allocations in automatic transfer line are considered with a point of view production rates, average stock, and mean delay. The propose of this paper is to provide the robust designs by Taguchi method which improve the efficiency of four-stage transfer line.

1. 서 론

인력비, 원가절감, 국제경쟁력 향상 등과 같은 전략적·기술적 문제로 인한 설비투자에 대한 관심이 증대되고 있다. 설비투자에 대한 우선순위 중에 가장 선행되는 부문이 자동화 혹은 무인화 부문일 것이다. 이러한 무인화 혹은 자동화는 실로 막대한 자금이 소요될 뿐만 아니라 이에 따른 위험 또한 무시할 수 없는 중요한 요인이다. 이러한 위험축소 그리고 선별적 자금투자의 한 방법이 부분적인 자동화를 구현하거나 한정된 자동화 혹은 무인화 시스템을 도입하는 것이다. 이를 위하여 무인화의 중간단계로 시스템을 구축한 후 자동화 혹은 무인화 시스템으로 확장하는 것이 바람직하다.

일반적인 자동흐름라인(automatic transfer line)은 각 작업장이 직렬로 연결된 하나의 생산 시스템으로 통상적인 이송 매커니즘이나 일반적인 제어 시스템하에서 운영되는 시스템을 말한다. 그러므로 이 시스템은 독립적인 기계로 구성된 작업장 간의 균형에 따라 생산효율에 영향을 준다. 이 시스템의 효율을 향상시키기 위한 방법 중의 하나는 생산 시스템의 작업장 사이에 완충재고(buffer storage)를 두는 것이다. 이 완충재고는 작업시 한 작업장에서의 고장으로 전체 라인을 정지시키는 문제를 감소시킬 수 있으며 사이클 타임의 변동률 줄일 수 있다. 두번째로는 각 작업장에 위치한 기계의 신뢰성이다. 따라서 시스템 설계시에 신뢰성이 높은 기계와 상대적으로 낮은 기계 간의 상대적인 위치를 고려하여야 한다.

* 신일전문대학 산업훈련과
** 동아대학교 대학원 산업공학과
*** 동아대학교 산업공학과

본 연구에서는 기계고장과 수리, 강제정지(forced down)에 의한 작업중지를 고려한 자동생산 시스템에서의 매개변수, 시스템 구조와 생산 작업장의 상대적 위치 및 완충재고량 할당에 관하여 생산량, 평균재고 및 평균지연의 관점에서 고찰하고 다구치 방법[7]에 의한 자동생산시스템의 안정설계를 구현하고자 한다.

2. 기존 연구의 고찰

자동흐름라인에 중요한 문제로서는 개별 작업장의 가동률보다 전체 라인의 가동률이 낮은 경우이다. 이 같은 경우에는 효율성에 관한 문제로 자동흐름라인의 특성상 다수의 작업장이 직렬형태로 구성되어 있기 때문이다. 이 같이 직렬로 구성되어 있는 경우 한 작업장이 멈추면 라인 상에 있는 모든 다른 작업장이 강제정지된다. 이를 극복하는 방법중에 하나는 각 작업장 사이에 완충재고를 둬으로써 라인의 마지막 작업장에서는 작업이 중지된 작업장에서 마지막 작업장 사이의 모든 완충재고가 고갈될 때까지 작업을 계속할 수 있다. 또한 라인의 첫 작업장은 첫번째 작업장에서 중지된 작업장 사이의 모든 완충재고의 최고 용량까지 작업을 계속할 수 있다. 완충재고를 고려하지 않는 경우에는 완충재고 대신에 라인의 길이를 설계에 반영함으로써 완충재고의 효과를 얻을 수 있다.

완충재고의 설치는 생산 효율을 증대시킬 수 있는 반면에 이들 완충재고가 유한인 경우에는 강제중지, 즉 재공품 부족이나 재공품 과잉현상이 발생한다. 완충재고를 설치하는 데는 설치비, 재고공간, 재고유지비 등이 필요할 뿐만 아니라 여러 가지 변수가 영향을 주고 있다. 하지만 기존 연구에서는 완충재고의 효과분석을 중점적으로 행함으로써 생산효율적인 면만을 강조하는 경향이 있다. 자동흐름라인의 생산율에는 생산작업장의 수, 완충재고량, 가동시간, 기계고장 및 수리분포와 같은 여러 가지 변수들이 영향을 미치므로 이들 변수를 고려한 설계가 필요하다.

Koenigsberg[6]는 완충재고를 고려한 자동흐름라인에 대한 분석적 연구를 하였으며 Buzacott[1]는 우발고장과 수리시간이 이산인 경우 수리적 해를 구했다. 또한 Gershwin과 Berman[2]는 마코프 과정을 이용하여 문제해결을 시도했으며 Law[3, 4]는 완충재고를 고려한 작업장이 6개인 자동흐름라인에서 4개의 작업장으로 변형된 자동흐름라인에 대한 컴퓨터 모형을 제시하였다. 또한 Law[5]는 작업장이 4개인 자동흐름라인에 대해 2³요인분석을 이용하여 생산율과 평균재고 및 평균지연의 반응에 대한 시스템 구조와 생산작업장의 상대적 위치 및 완충재고량 할당 등의 유의성 검정을 행하였다.

본 연구는 자동흐름라인 시스템의 설계에 다른 대안으로써 제 성능특성에 따라 SN 비를 최대로 하는 유의한 인자들의 최적수준을 선택할 수 있는 다구치 방법[7]으로 자동흐름라인의 최적설계를 구현하고자 한다.

3. 자동흐름라인

3.1 자동흐름라인의 시스템 구조

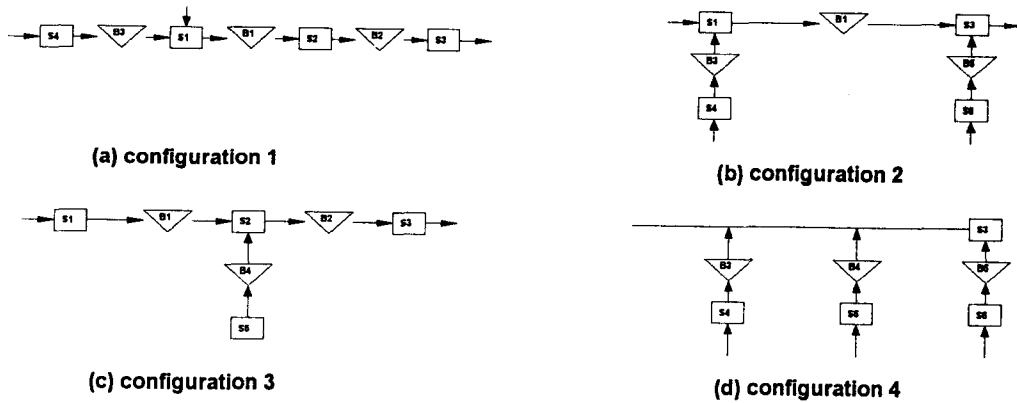
자동흐름라인의 시스템 구조는 중요한 변수이므로 충분히 보편성이 있는 자동흐름라인의 모형이 요구된다. 이 일반화된 모형은 6개의 작업장으로 구성되어 있으며 1개의 주 라인(main line)과 3개의 부 라인(sub-line)을 갖고 있는 시스템으로 Law[3]에 의해 제안되었다. 하지만 Buzacott[1]는 실질적 시스템에서 작업장이 5개 이상인 자동흐름라인 시스템의 상황을 정식화하는 것은 상당히 어렵다는 결론을 짓고 있다. 따라서 본 연구에서 Law[3]가 제안한 시스템 구조로서 작업장을 6개를 갖는 모형을 Fig. 1과 같이 작업장이 4개인 직렬 시스템을 변형시킨 4가지 형태이다.

3.2 자동흐름라인의 생산작업장별 상대적 위치

시스템 구조 내에 위치한 각 작업장간의 상대적으로 높고 낮은 생산율을 각각 'H(High)', 'L(Low)'로 표시하며 Table 1과 같이 정의한다.

Table 1 Types of relative stage position

Stage	μ_i	λ_i	Theoretical production rate
H	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{400}$	0.9524
L	$\frac{1}{20}$	$\frac{1}{50}$	0.7143



단, $S_i(i=1,2,\dots,6)$: i 번째 작업장 ; $B_i(i=1,2,\dots,6)$: i 번째 완충재고

Fig. 1. Variants of four-stage series system configurations

작업장 'H'는 신뢰성이 높은 기계이며 작업장 'L'은 상대적으로 신뢰성이 낮은 기계이다. 따라서 작업장sl 4개인 시스템은 Table 2과 같은 6가지의 형태로 구분할 수 있다.

Table 2. Types of relative position by pattern

No.	Pattern
1	L L H H
2	L H L H
3	L H H L
4	H L H L
5	H L L H
6	H H L L

3.3 완충재고량 할당

본 연구에서 고려한 완충재고량은 총 120단위이며 작업장이 4개인 시스템에서 각 작업장 사이에 위치한 완충재고 공간은 3곳이다. 총 120단위에 대한 5가지 형태의 완충재고 할당은 Table 3와 같다.

Table 3. Types of buffer allocation

No.	Type	Buffer capacity allocation(units)		
		B_3	B_2	B_1
1	Uniform	40	40	40
2	Increasing	10	40	70
3	Decreasing	50	20	50
4	Convex	30	60	30
5	Concave	70	40	10

4. 안정설계에 의한 시스템 설계

4.1 모형설정

시스템 구조는 Fig. 1과 같이 4가지 형태의 직렬 시스템으로 각 작업장은 수리률(μ_i)는 0.05이고 고장률(λ_i)가 0.005이다. 그리고 이론적 생산율은 $0.90909[1/(1+\lambda_i/\mu_i)]$ 이며 각 생산작업장의 완충재고량은 각 40단위씩 총 120단위이다. 또한 각 작업장의 상대적 위치는 앞에서 언급한 것과 같이 Table 1과 같다. 완충재고량 할당에 고려한 구조는 순수 직렬시스템 구조(형태 1)이고 여기서는 수리률이 0.05이고 고장률이 0.005이다. 또 이론적 생산율은 0.90909이다. 따라서 총 고정된 용량 120단위에 따른 5가지 형태의 각 완충재고량 할당은 Table 3과 같다.

개별적인 작업장의 수행은 다음과 같은 가능한 상태

- 1) 작업중 혹은 가동중
- 2) 기계고장, 공구교환 및 조정
- 3) 강제중지

로 정의할 수 있다.

각 작업장의 고장은 확률적이며 제시된 모형의 일반적인 가정은 다음과 같다.

- 1) 한 사이클 시간동안 작업장 i 에서의 고장률은 일정한 λ_i 이다.
- 2) 한 사이클 시간동안 작업장 i 에서의 수리률은 일정한 μ_i 이다.
- 3) 기계가 고장시 가동중인 부품은 손상되거나 폐기되지 않는다.
- 4) 한 사이클동안에 복수의 작업장이 동시에 고장날 수 있다.
- 5) 강제중지 상태에서의 고장률은 0이다.
- 6) 첫번째 작업장에서의 재공품 부족과 마지막 작업장에서의 재공품 과다와 같은 현상은 없다.

또한 고장과 수리특성에 관한 가정으로 부터 작업시간과 수리시간은 기하분포를 따른다. 이에

따른 3가지 중요한 반응은 다음과 같다.

- 1) 생산율(production rate)
- 2) 평균재고(average stock)
- 3) 평균지연(mean delay)

4.2 안정설계 및 분석

시스템 구조와 각 생산단계의 상대적 위치 및 완충재고량 할당에 대한 각각의 생산율과 평균재고 및 평균지연에 관해 안정설계를 위한 다구치 방법을 사용한다. 또한 각 특성별로 분석하여 Law[5]의 2³요인배치법과 비교하였다.

인자수준선정은 사전분석결과 일반모형에 대한 통계적 분석의 결과에 따라 시스템 구조에서는 첫번째 구조가 가장 낮은 평균재고와 평균지연을 보이며 4번째 구조가 다른 1, 2, 3번째 구조보다 상대적으로 낮은 생산율을 나타내고 있다. 또한 가장 높은 평균재고와 평균지연을 보이고 있다. 생산단계의 상대적 위치에서는 3번째 형태(LHHL)와 5번째 형태(HLLH)를 채택하였고 완충재고량 할당에서는 1번째 형태와 4번째 형태를 각각 선택하였다. Fig. 2는 통계적 분석에 의해 각 인자들중에서 유의차가 있는 2수준을 'High'와 'Low'의 수준으로 선정하고 각각의 수준에 대하여 Fig. 2와 같다. 이때 고려한 인자들은 다음과 같다.

- 인자 A: 시스템 구조
- 인자 B: 생산단계의 상대적 위치
- 인자 C: 완충재고량 할당

2수준계 직교배열표를 이용하여 망대특성인 생산율의 실험과 분석을 하였다. 생산율에 영향을 주리라 생각되는 제어인자로는 Table 4와 같으며 생산율 실험의 자료는 Table 6과 같다.

Table 4. Factors and levels

Factor	Level	
	0	1
A: system configuration	1	4
B: relative position	3	5
C: buffer allocation	1	4

교호작용으로는 A×B, A×C, B×C, A×B×C를 조사하고 잡음인자로서는 생산조건을 3수준

- N₀ = 좋은 조건(suitable condition)
- N₁ = 보통 조건(normal condition)
- N₂ = 나쁜 조건(worse condition)

으로 택하여 L₈(2⁷)형 직교배열표를 사용하여 분석하였다. 직교배열의 배치와 자료는 Table 6과 같다. 우선 망대특성인 생산율에 대해 분산분석을 실시하기 위하여 각 수준에서 SN 비를 구하면 Table 5와 같다.

Table 5. SN ratio on production rate(decibels)

Factor Level	A	B	C	A×B	A×C	A×C	A×B×C
0	0.2539	0.9290	0.4922	0.2940	0.3400	0.3867	0.1735
1	0.2120	-0.4631	-0.0263	0.1719	0.1259	0.0692	0.2924
Total	0.4659	0.4659	0.4659	0.4659	0.4659	0.4659	0.4659

Table 6. Layout and data on production rate

Factor	A	B	A×B	C	A×C	B×C	A×B×C	Production rate			SN rate
No.	1	2	3	4	5	6	7	Noise factor			$SN_i = SN_i - 37.5$
								N_0	N_1	N_2	
1	0	0	0	0	0	0	0	84.18	83.93	69.54	0.3704
2	0	0	0	1	1	1	1	88.74	81.66	66.73	0.1351
3	0	1	1	0	0	1	1	84.41	84.13	62.10	-0.0603
4	0	1	1	1	1	0	0	81.87	82.48	61.86	-0.1913
5	1	0	1	0	1	0	1	84.82	82.11	69.02	0.3056
6	1	0	1	1	0	1	0	81.69	82.10	67.27	0.1179
7	1	1	0	0	1	1	0	83.21	81.83	62.61	-0.1235
8	1	1	0	1	0	0	1	83.09	81.89	63.19	-0.0880
Present level								82.25	81.44	60.79	-0.2899

상기 자료로부터 인자의 변동과 교호작용의 변동을 구하여 얻어진 분산분석표는 Table 7과 같다.

Table 7. Analysis of variance on production rate

Factor	S	f	V	F_0	$p(\%)$
A	0.0002	1	0.0002 [○]	—	
B	0.2422	1	0.2422	150.92**	80.25
C	0.0336	1	0.0336	14*	10.44
A×B	0.0019	1	0.0019 [○]	—	
A×C	0.0057	1	0.0057 [○]	—	
B×C	0.0134	1	0.0134	5.48	3.68
A×B×C	0.0018	1	0.0018 [○]	—	
e	0.0000	0	0.0000		
(e)	(0.0096)	(4)	(0.0024)		5.63
Total	0.2988	7			100(%)

(첨자 ○는 풀림을 의미한다.)

Table 7에서 유의한 인자는 B, C이다. 모평균을 추정하기 위해 B와 C에 대한 95% 신뢰구간의 폭을 구해보면

$$\pm \sqrt{\frac{F \times V_e}{n_e}} = \pm 0.068$$

와 같으며 B와 C의 수준조합에서는

$$\pm \sqrt{\frac{F \times V_e}{n_e}} = \pm 0.096$$

이다. 유의한 인자 B, C에 대해 SN 비 측면에서 최적조합수준을 구해보면 B₀, C₀이다. 이 최적 조합에서 SN 비의 짐추정값은

$$\hat{\mu} = \overline{B_0 C_0} = 37.84$$

이다. 그리고 최적조건에서의 MSD = 10^{-3.784} = 0.0001644이다. 이 값은 현수준인 MSD보다 0.000026 감소되었다.

Table 8. Layout and data on average stock

Factor No.	A	B	A×B	C	A×C	B×C	A×B×C	Average stock			SN rate SN _i = SN _i - 37.5
	1	2	3	4	5	6	7	Noise factor			
								N ₀	N ₁	N ₂	
1	0	0	0	0	0	0	0	20.17	20.24	21.16	0.2529
2	0	0	0	1	1	1	1	18.25	20.83	22.14	0.2771
3	0	1	1	0	0	1	1	18.03	18.94	19.32	1.0302
4	0	1	1	1	1	0	0	20.75	21.59	21.67	-1.0815
5	1	0	1	0	1	0	1	19.89	20.54	29.63	-1.0216
6	1	0	1	1	0	1	0	19.40	21.21	28.58	-0.8853
7	1	1	0	0	1	1	0	19.91	20.49	27.70	-0.7251
8	1	1	0	1	0	0	1	19.43	20.07	20.30	-0.4776
Present level								25.40	22.02	31.85	-2.6114

Table 9. Analysis of variance on average stock

Factor	S	f	V	F ₀	p(%)
A	2.6319	1	2.6319	29.18**	73.51
B	0.1575	1	0.1575 [○]	—	
C	0.0618	1	0.0618 [○]	—	
A×B	0.0102	1	0.0102 [○]	—	
A×C	0.2705	1	0.2705 [○]	2.30	5.21
B×C	0.1313	1	0.1313	—	
A×B×C	0.1945	1	0.1945 [○]	2.16	3.02
e	0.0000	0	0.0000		
(e)	(0.3608)	(4)	(0.6911)		18.26
Total	3.4577	7			100(%)

두번째로 망소특성인 평균제고에 대한 실험의 자료 및 분산분석표는 각각 Table 8과 9와 같다. 분산분석표에서 보는 바와 같이 유의한 인자는 A이며 최적수준조합은 A_0 이다. 이 최적조합에서 SN 비의 점 추정값은

$$\hat{\mu} = \overline{A_0} = -26.1303$$

이므로 현수준의 SN 비인 -29.1114보다 2.9811(db) 만큼 증가되었다. 따라서 현수준보다 MSD가 1/1.99만큼 감소된다.

끝으로 망소특성인 평균지연에 대한 실험자료 및 분산분석표는 Table 10 및 11과 같다. 유의한 인자는 B이며 최적수준조합은 B_0 이다. 이 최적조합에서 SN 비의 점 추정값은

$$\hat{\mu} = \overline{B_0} = -22.1707$$

이므로 현수준의 SN 비인 -24.7944 보다 2.6237(db) 만큼 증가된다. 따라서 현수준보다 MSD가 1/1.83 만큼 감소된다. 상기와 같이 분석한 자료로 부터 각 반응에 영향을 미치는 독립변수들을 정리하면 Table 12과 같다. Table 12에서 2^3 요인실험의 95%와 99% 신뢰수준에서 유의한 인자중에서 다구치 방법의 95%, 95% 신뢰수준에서 기각되는 인자들이 있음을 알 수 있다.

Table 10. Layout and data on mean delay

Factor No.	A	B	A×B	C	A×C	B×C	A×B×C	Mean delay			SN rate $SN_i = SN_i - 37.5$
	1	2	3	4	5	6	7	Noise factor			
								N_0	N_1	N_2	
1	0	0	0	0	0	0	0	6.42	9.05	16.25	1.8921
2	0	0	0	1	1	1	1	7.68	8.90	17.15	-1.0473
3	0	1	1	0	0	1	1	7.75	8.11	25.34	-1.0821
4	0	1	1	1	1	0	0	8.19	10.81	24.68	-1.2217
5	1	0	1	0	1	0	1	7.64	10.22	18.08	0.8719
6	1	0	1	1	0	1	0	8.77	9.32	15.82	1.6007
7	1	1	0	0	1	1	0	8.52	9.63	22.28	-0.4356
8	1	1	0	1	0	0	1	8.87	10.18	24.14	-1.0657
Present level								9.58	11.04	26.29	-1.7944

Table 11. Analysis of variance on mean delay

Factor	S	f	V	F_0	$\rho(\%)$
A	0.7383	1	0.7383 [○]	—	
B	6.3413	1	6.3413	9.18*	47.25
C	1.1103	1	1.1103 [○]	—	
A×B	0.0851	1	0.0851 [○]	—	
A×C	1.2622	1	1.2622 [○]	—	
B×C	0.2595	1	0.2595 [○]	—	
A×B×C	2.1618	1	2.1618	3.13	12.30
e	0.0000	0	0.0000		
(e)	(3.4554)	(5)	(3.4554)		40.45
Total	11.9585	7			100(%)

Table 12. Independent variables which affect response

Response	Method	Independent variable						
		A	B	C	AB	AC	BC	ABC
Production rate	2 ³ factorial experiment	NS	S	S	S	S	S	NS
	Taguchi's parameter design	NS	S	S	NS	NS	S [△]	NS
Average stock	2 ³ factorial experiment	S	S	S	S	S	NS	S
	Taguchi's parameter design	S	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Mean delay	2 ³ factorial experiment	NS	S	S	S	S	S	NS
	Taguchi's parameter design	NS	S	NS	NS	NS	NS	NS

(A: 시스템 구조, B: 생산작업장의 상대적 위치, C: 완충재고량 할당 S: 95%와 99% 신뢰수준에서 유의함, NS: 95%와 99% 신뢰수준에서 유의하지 않음, S[△]: 90% 신뢰수준에서 유의함을 의미한다.)

Table 13. Summary results on each method

Response	Method	SN ratio	MSD
Production rate	2 ³ factorial experiment	37.2101	0.0001901
	Taguchi's parameter design	37.8400	0.0001644
Average stock	2 ³ factorial experiment	-29.114	814.9670
	Taguchi's parameter design	-26.1303	410.2320
Mean delay	2 ³ factorial experiment	-24.7944	301.6060
	Taguchi's parameter design	-22.1707	164.843

Table 13에서 보는 바와 같이 다구치 방법과 2³요인실험을 비교한 결과 다구치 방법이 좀더 나은 결과를 보였다.

5. 결론

본 논문에서는 완충재고를 고려한 자동흐름라인 시스템에 관한 시스템 구조, 생산작업장의 상대적 위치 및 완충재고량 할당문제를 생산율, 평균재고 및 평균지연의 관점에서 분석하였다. 앞에서 살펴본 바와 같이 생산율은 생산작업장의 상대적 위치와 완충재고량 할당에 영향을 받을 수 있으며 유의수준 0.10에서는 생산작업장의 상대적 위치와 완충재고량의 복합적인 영향을 받을 수 있다. 평균재고는 단지 시스템 구조에만 영향을 받고 있으며 이는 완충재고량 할당이 평균재고에 영향을 미치고 있지 않음을 알 수 있다. 평균지연은 생산단계의 상대적 위치에만 영향을 받고 있음을 알 수 있으며 3가지 독립변수인 시스템구조, 생산단계의 상대적 위치 및 완충재고를 고려했을 때 각 반응변수인 생산율, 평균재고 및 평균지연에 관해 SN 비 측면에서 최적조합을 제시하였다. 따라서 실제적인 자동흐름라인 시스템을 설계시에 3가지 반응에만 국한시키지 않고 다특성인 경우 계수치와 계량치의 혼합형인 경우와 인자와 수 준수가 다인자 다수준의 복합적인 문제를 분석함으로써 더욱 효율적인 시스템의 안정설계를 할 수 있으리라 생각된다.

참 고 문 헌

1. Buzacott, J. A., "Automatic transfer lines with buffer stocks," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 9, No. 4, pp. 425-436, 1971.
2. Gershwin, S. B. and Berman, O., "Analysis of transfer lines consisting of two unreliable machines with random processing times and finite storage buffers," *AIIE Transactions*, Vol. 3, No. 1, pp. 2-11, 1981.
3. Law, S. S., "A Statistical analysis of system parameters in automatic transfer lines," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 19, No. 6, pp. 709-724, 1981.
4. Law, S. S., "A Generalized simulation for automatic transfer line system," *CIRP Annuals Manufacturing Technology*, Vol. 31, No. 1, 1982.
5. Law, S. S., "A factorial analysis of automatic transfer line systems," *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 21, No. 6, pp. 827-834, 1983.
6. Koenigsberg, E., "Production lines and internal storage - a review," *Management Science*, Vol. 5, No. 4, pp. 410-433, 1959.
7. Taguchi, G., *Introduction to Quality Engineering Designing Quality into Products and Processes*, Asian Productivity Organization, pp. 121-142, 1986.