

제약이론과 시물레이션을 이용한 진단 의료 혈액분석기의 생산성 향상 방안 연구

맹주혁¹ · 이강원^{1†}

Study on the Productivity Improvement of Diagnostic Medical Blood Analyzers using Theory of Constraints and Simulation

Ju-Hyuck Maeng · Kang-Won Lee

ABSTRACT

There is a high demand for the diagnostic medical blood analyzer in the global medical device market. The domestic market is in infant stage, but expected to grow very fast. In this study, we attempt to provide several ways for production improvement in order to secure price competitiveness of domestic medical blood analyzer. For this purpose we identify the problems of current production process using ARENA simulation and suggest several alternatives for productivity improvement. Five steps of TOC (Theory of Constraints) and ARENA simulation are employed to predict productivity of each alternative and to suggest further improvement.

Key words : Simulation, ARENA, Theory of Constraints, Factory Automation, Blood Analyzers, Medical Devices

요약

진단 의료 혈액 분석기는 세계 의료기기 시장에서 지속적인 고성장세를 이어가고 있다. 본 연구에서는 국내 혈액분석기가 진단 의료기기 시장에서 가격경쟁력을 높여갈 수 있도록 비용을 절감시키면서 낮은 생산원가를 실현시킬 수 있는 생산성 향상 방안을 마련하는데 중점을 두었다. TOC 제약이론의 집중개선 5단계와 공장자동화 전략을 기반으로 시물레이션을 모델링하였으며 단계별로 대안을 제시하고 결과를 예측하여 분석하였다. ARENA 시물레이션을 이용하여 현장의 상황을 정확히 모델링하였으며 TOC 제약이론 집중개선 5단계를 도입하여 보다 체계적이고 효과적으로 개선하였다. 제약공정의 능력을 확장하는 단계에서는 적절한 공장자동화를 통하여 생산성을 크게 향상시켰으며 자동화 설비 도입에 따른 경제성 분석을 실시하여 투자대비 효과를 입증하였다.

주요어 : 시물레이션, ARENA, 제약이론, 공장자동화, 혈액분석기, 의료기기

1. 서론

전 세계 의료기기 시장은 의료복지에 대한 수요의 증가와 함께 지속적으로 성장하고 있고, 그에 따라 국내 의료기기 시장도 큰 폭으로 성장하고 있는 추세이다. 그러

나 국내 의료기기산업은 영세 중소기업을 중심으로 구성되어 있고 선진국에 비해 기술력, 자본력, 인지도 등이 매우 부족한 현실이기 때문에 무역수지 적자는 계속되고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고 국내 의료기기산업의 경쟁력을 개선하기 위해서는 향후 발전 가능한 품목에 대해 파악하고 분석함으로써 적절한 규모의 확대와 생산성 향상을 통하여 효율성을 개선해야 한다고 판단된다.

최근에는 국민들의 소득수준이 향상되고 삶의 질에 대한 관심이 높아지면서 보건의료 개념이 질병 치료에서 예방으로 진화해 가고 있다. 따라서 진단 의료기기 시장은 앞으로도 고성장세를 이어갈 것으로 전망되고 있다^{1,2,3}.

본 연구에서는 진단 의료기기 시장의 필수 품목인 혈

*이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술 연구비 지원으로 수행되었다.

접수일(2013년 3월 19일), 심사일(2013년 5월 5일), 게재 확정일(2013년 6월 21일)

¹⁾ 서울과학기술대학교 정보산업공학과

주 저 자 : 맹주혁

교신저자 : 이강원

E-mail; kwlee@snut.ac.kr

Table 1. Survey Results

Product Attributes	Importance Scores	Satisfaction Scores	
		A Company	Average of Other Companies
Performance	3.0	4.1	3.3
Quality	4.0	4.0	3.9
Price	4.5	3.4	3.6
A/S	4.0	4.0	3.3
Relationship	3.0	3.5	3.7
Design	2.5	4.0	3.9
Education	2.5	3.1	2.9
Exhibition	2.5	3.2	3.1
Average	3.3	3.6	3.1

액분석기를 대상으로 하여 생산성 향상에 대한 방안을 제시하고자 한다. 분석 대상기업으로는 국내 혈액 분석기 시장을 선도하고 있는 A 기업을 선정 하였다. 먼저 국내 혈액분석기의 문제점 및 개선할 사항을 파악하기 위하여 국내 234개의 병원을 대상으로 2011.02.08 ~ 2011.03.30 동안 설문조사를 실시하였다. Table 1의 설문조사 결과를 살펴보면 대부분의 국내 병원에서는 가격경쟁력을 요구하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 가격적인 측면에서 경쟁력을 높이기 위해 비용을 절감시키

면서 낮은 생산원가를 실현시킬 수 있는 생산성 향상 방안을 마련하는데 중점을 두고 접근하고자 한다. 첫째, ARENA 시뮬레이션을 이용하여 현장의 상황을 정확히 분석할 것이며^[4-8] 둘째, 생산성 향상을 위하여 TOC 제약 이론의 집중개선 5단계를 도입하여 시스템을 개선해 나갈 것이다^[9,10]. 마지막으로 규모를 확대하고 생산비용을 절감하기 위하여 적절한 공장자동화를 도입해 나갈 것이다^[11-13].

서론에 이어 2장에서는 현 공정의 흐름을 분석 하였으며 3장에서는 ARENA 시뮬레이션을 이용한 시스템 모델 및 분석을 실시하였다. 4장에서는 TOC 제약이론과 시뮬레이션을 이용해 TOC 5단계 분석을 하였으며 5장에 결론을 다루었다.

2. 시스템 분석

2.1 공정의 흐름

혈액분석기에서 카트리지 소모품을 생산하는 작업공정은 크게 용액 파트, 센서 파트, 카트리지 조립 파트, QC 파트로 분류할 수 있다. 세부적으로 분류할 경우 Fig. 1에서 보듯이 총 35개의 공정으로 구성되어 있다.

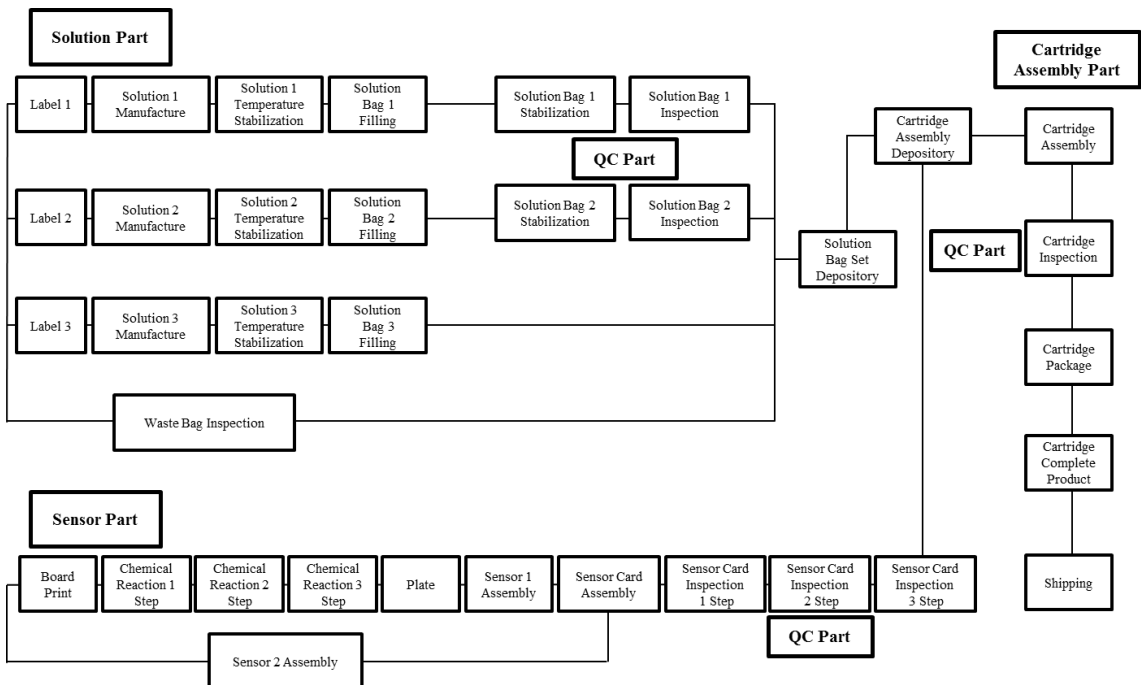


Fig. 1. Process Flow Chart

용액 파트는 용액백 1, 용액백 2, 용액백 3, 폐기백으로 구성된 용액백 Set를 생산하는 과정이며 각 용액백을 생산하기 위한 공정의 흐름은 다음과 같다. 용액백 생산에 필요한 원자재를 출하하여 라벨작업을 하고 작업이 끝나면 조성에 맞게 용액을 제조한 후 반응조에 보관한다. 반응조에 보관중인 용액이 온도 안정화가 될 수 있도록 조건을 설정하고 기다린다. 용액의 온도 안정화공정이 조건을 만족하면 반응조에 보관중인 용액을 백안에 충전한다. 이때 용액백은 200개가 충전된다. 즉, 용액을 한번 제조하면 200개의 용액백을 생산할 수 있고 이를 생산단위로 한다. 용액백 1, 2, 3을 생산하기 위한 과정은 모두 동일하나 각 용액백마다 용액 제조 및 온도 안정화, 용액백 충전공정의 작업시간은 차이가 있다. 폐기백은 내부공정이 아닌 아웃소싱 방식으로 생산이 진행된다. 외주업체에서 폐기백이 가공되어 입고되면 용액 파트에서 검사 작업을 진행한다.

센서 파트는 내부공정을 거쳐 생산된 센서 1과 아웃소싱 방식으로 생산된 센서 2가 조립되어 센서카드가 생산되는 작업흐름으로 이루어져 있다. 먼저 1000개의 센서카드를 만들기 위한 기관 인쇄 작업을 하고 기관 인쇄가 끝나면 3단계로 구성된 화학반응 작업을 한다. 이 공정까지의 생산단위는 1000개가 된다. 다음으로 도금작업이 진행되는데 이 공정부터는 생산단위가 1000개에서 200개 단위로 바뀌게 된다. 즉, 기관 인쇄에서 화학반응 3단계 공정까지 한번의 작업이 진행되면 도금공정부터는 다섯번으로 나누어 작업이 진행된다. 도금작업이 마무리되면 센서 1을 조립하고 아웃소싱 방식으로 생산되어 입고된 센서 2를 조립한다. 센서 1과 센서 2가 완성되면 함께 조립하여 센서카드 생산을 완료한다.

QC 파트는 각 파트의 생산공정에서 완료된 재공품이 카트리지를 조립에 사용될 수 있도록 검사하는 역할을 하며, 또한 완제품이 최종 소비자에게 판매될 수 있도록 검사하는 역할을 한다. 용액 파트에서 생산된 용액백 1과 용액백 2를 QC 보관실에서 24시간이상 보관한 후 검사를 진행하고 센서 파트에서 생산된 센서카드의 검사는 3단계를 거쳐 진행한다. 200개의 센서카드 생산이 완료되면 100개 단위로 센서카드를 검사한다.

위의 여러 공정을 거쳐 용액백 Set와 센서카드의 생산이 완료되면 카트리지를 조립 생산공정에서 카트리지를 조립 및 QC 검사, 카트리지를 포장 작업이 100개 단위로 이루어진다. 완성된 제품은 주문에 의한 출하가 되기까지 완제품 창고에 보관된다.

2.2 공정의 분석

각 파트에서 사용되는 자원의 명칭 및 용량은 Table 2에 나타내고 있으며, 각 공정에 할당되는 자원 및 수량, 평균 작업시간은 Table 3에 나타내고 있다. 표에서 보듯이 각 공정은 기계설비나 작업자 또는 두 가지 모두로 구성되어 있으며 평균 작업시간은 생산단위를 기준으로 측정하여 상수로 표현하였다. 각 파트의 작업공정에 대한 특징은 다음과 같다.

현재 용액 파트의 작업인원은 총 4명으로 이루어져 있으며 용액 제조 작업자 2명과 용액백 충전 작업자 2명으로 구분되어 있다. 용액 제조 작업자 2명은 용액 파트의 모든 공정에 투입이 가능하고 용액백 충전 작업자 2명은 용액 제조를 제외한 나머지 공정에 투입이 가능하다. 용액백을 생산하는 과정에서는 반응조의 자원용량이 각 1대씩으로 한정되어 있다. 그러나 제조, 온도 안정화, 충전공

Table 2. Resource Name and Capacity of Each Part

Location	No.	Resource Name	Capacity
Solution Part	1	Solution Manufacture Operator	2
	2	Solution Bag Filling Operator	2
	3	Solution 1 Reactor	1
	4	Solution 2 Reactor	1
	5	Solution 3 Reactor	1
	6	Solution Bag 1 Filling Machine	1
	7	Solution Bag 2 Filling Machine	1
	8	Solution Bag 3 Filling Machine	1
	9	Waste Bag Inspection Machine	3
Sensor Part	10	Sensor Operator	3
	11	Board Print Machine	1
	12	Chemical Reaction Machine	5
	13	Plate Machine	2
	14	Sensor 1 Assembly Machine	1
QC Part	15	Press Machine	1
	16	QC Operator	1
	17	Solution Bag Inspection Machine	1
	18	Sensor Card 1, 2 Step Inspection Machine	4
	19	Sensor Card 3 Step Inspection Machine	2
Cartridge Assembly Part	20	Cartridge Inspection Machine	3
	21	Cartridge Operator	2
	22	Barcode Machine	1

정에 모두 할당이 되기 때문에 모든 공정이 동시에 진행될 수 없다. 예를 들어 용액백 1 충전작업이 진행 중일 경우 용액 1을 제조할 수 없다. 충전작업이 완료되어 반응조 자원을 놓아줄 경우에만 제조가 가능하다. 또한 용액을 제조한 후 온도 안정화를 하는 과정에서는 작업자가 할당되지 않는다. 즉, 작업자가 퇴근 후에도 온도 안정화 공정은 계속 진행된다. 폐기백 검사는 작업자 1명이 장비 3대를 사용하여 검사한다.

센서 파트의 작업인원은 총 3명으로 이루어져 있으며 작업자 3명은 센서 파트의 모든 작업공정에 투입이 가능하다. 화학반응 1단계, 2단계, 3단계 공정에서는 자원이 모두 공통으로 할당되기 때문에 공정이 동시에 진행될 수

없다. 그러므로 3단계 작업이 모두 완료된 후에 다음 생산단위의 1단계 작업이 진행될 수가 있다. 또한 화학반응 2단계에서는 작업자가 할당되지 않기 때문에 작업자가 퇴근 후에도 화학반응 2단계공정은 계속 진행된다. 화학반응 공정은 작업자 1명이 장비 5대를 사용하여 작업하고 도금 공정은 작업자 1명이 장비 2대를 사용하여 작업한다.

QC 파트의 작업인원은 1명이며 센서카드 검사 1단계, 2단계 공정에서는 자원이 공통으로 할당되기 때문에 두 공정이 동시에 진행될 수 없다. 그러므로 2단계 검사가 완료된 후에 다음 생산단위의 1단계 검사가 진행될 수 있다. 센서카드 검사 2단계에서는 작업자가 할당되지 않는다. 센서카드 검사단계는 작업자 1명이 장비 4대와 2대를

Table 3. Cycle Time and Allocated Resources

Location	Process	Cycle Time (hr)	Resource		
			No	Quantity	
				Worker	Machine
Solution Part	Label 1	1	1 or 2	1	-
	Solution 1 Manufacture	3.5	1, 3	1	1
	Solution 1 Temperature Stabilization	8	3	-	1
	Solution Bag 1 Filling	7	1 or 2, 3, 6	2	1
	Label 2	1	1 or 2	1	-
	Solution 2 Manufacture	1.5	1, 4	1	1
	Solution 2 Temperature Stabilization	2	4	-	1
	Solution Bag 2 Filling	4	1 or 2, 4, 7	2	1
	Label 3	1	1 or 2	1	-
	Solution 3 Manufacture	3	1, 5	1	1
	Solution 3 Temperature Stabilization	12	5	-	1
Solution Bag 3 Filling	5	1 or 2, 5, 8	2	1	
Waste Bag Inspection	4	1 or 2, 9	1	3	
Sensor Part	Board Print	14	10, 11	1	1
	Chemical Reaction 1 Step	3	10, 12	1	5
	Chemical Reaction 2 Step	72	12	-	5
	Chemical Reaction 3 Step	5	10, 12	1	5
	Plate	7	10, 13	1	1
	Sensor 1 Assembly	5	10, 14	1	1
	Sensor 2 Assembly	2	10	1	-
	Sensor Card Assembly	5	10, 15	1	1
QC Part	Solution Bag 1 Stabilization	24	-	-	-
	Solution Bag 1 Inspection	0.5	16, 17	1	1
	Solution Bag 2 Stabilization	24	-	-	-
	Solution Bag 2 Inspection	0.5	16, 17	1	1
	Sensor Card Inspection 1 Step	1	16, 18	1	4
	Sensor Card Inspection 2 Step	1.5	18	-	4
	Sensor Card Inspection 3 Step	1	16, 19	-	2
Cartridge Assembly Part	Cartridge Assembly	7	21, 22	1	1
	Cartridge Package	1.5	21	1	-
	Cartridge Inspection	2	16, 20	1	3

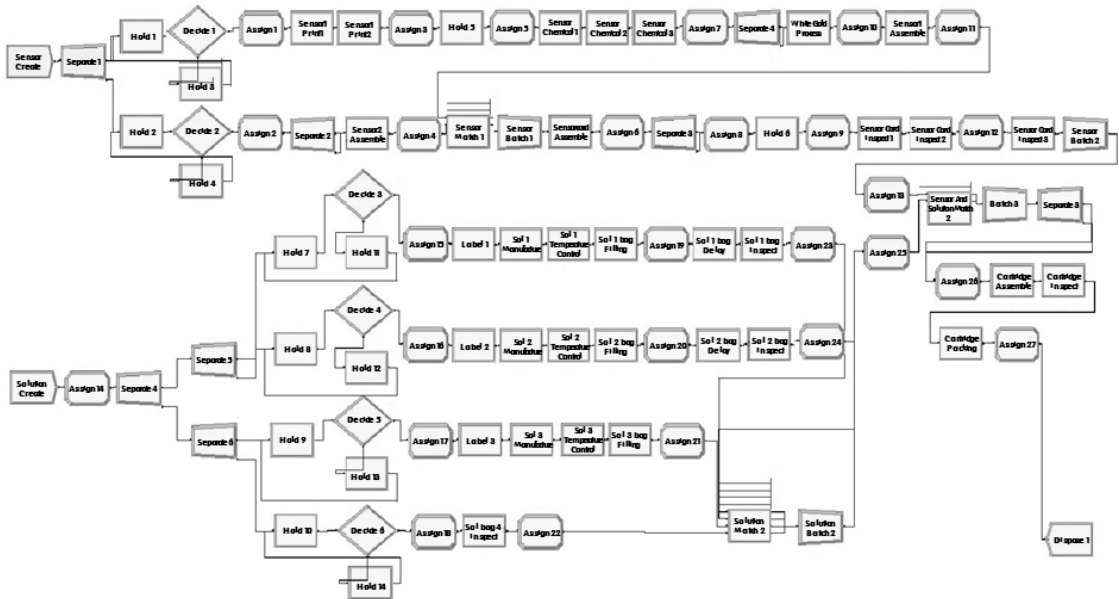


Fig. 2. Simulation Model

사용하여 검사하고 카트리지 검사는 작업자 1명이 장비 3대를 사용하여 검사한다.

카트리지 조립 파트는 수작업이며 용액백 Set(용액백 1, 용액백 2, 용액백 3, 폐기백)와 센서카드(센서 1, 센서 2)의 생산이 모두 완료된 경우에 진행될 수 있다.

3. 시스템 모델 및 분석

3.1 시뮬레이션 모델링

Arena 13.0을 사용하여 시뮬레이션 모델링 하였으며, 입력 데이터는 Table 2, Table 3의 값을 각 해당 모듈에 입력하였다. 대상시스템에 대해 구축한 시뮬레이션 모형의 ARENA 모듈은 Fig. 2와 같다. Create 모듈에서 개체가 생성되는 것은 대상기업 A의 마케팅 영업부에서 제공한 연도별 예상 주문생산량을 기초로 하였다. 판매실적에 따른 연도별 예상 주문생산량은 Table 4와 같다.

작업자가 퇴근한 후에도 온도안정화 및 화학반응 2단계 같은 공정들은 계속 진행되기 때문에 하루의 시간 길이를 24시간으로 설정하였고 작업자의 일과시간은 오전 9시에서 오후 6시까지로 설정하였다.

3.2 시뮬레이션 결과분석

시뮬레이션 모형에 대한 결과는 Table 5에서 보듯이

Table 4. Yearly Demand Forecast

Year	Cartridge Sales Plan (EA)	Input (EA)
2012	19,472	20,000
2013	33,123	30,000
2014	47,848	50,000
2015	75,416	75,000
2016	109,061	100,000

주문량이 생산능력을 초과하여 증가하게 될 경우 최종 완제품인 카트리지의 생산량이 감소하는 결과가 나타났다. 그 원인은 주문이 현재공정의 생산능력을 초과하게 될 경우 한정된 자원의 분배가 적절하게 이루어지지 못하고 생산 불균형 현상을 초래하기 때문이다. 관리자는 제품을 생산하는 과정에서 적절한 생산일정을 통해 작업 균형을 유지해가며 생산할 수 있도록 해야 한다. 예를 들어 용액백 1, 2, 3이 1000개씩 생산되었더라도 폐기백이 100개 생산되었다면 용액백 Set은 100개가 되며 용액백 1, 2, 3의 나머지 900개씩은 재공품 재고가 되기 때문이다. 재공품이란 공장에서 생산과정 중에 있는 물품으로서 본 연구에서는 용액백 Set(용액백 1, 용액백 2, 용액백 3, 폐기백)와 센서카드(센서 1, 센서 2)가 해당된다. 재공품 재고는 적절한 수준을 유지해가며 생산하는 것이 효율적이라고

Table 5. Cartridge Production Amount When Inventory in Process Is Not Controlled

Input (EA)	Cartridge Output (EA)	Solution Bag Set	Output (EA)
20,000	20,000	Solution Bag 1	20,000
		Solution Bag 2	20,000
		Solution Bag 3	20,000
		Waste Bag	20,000
30,000	30,000	Solution Bag 1	30,000
		Solution Bag 2	30,000
		Solution Bag 3	30,000
		Waste Bag	30,000
50,000	28,400	Solution Bag 1	29,000
		Solution Bag 2	45,600
		Solution Bag 3	28,400
		Waste Bag	50,000
75,000	26,400	Solution Bag 1	27,400
		Solution Bag 2	45,200
		Solution Bag 3	26,400
		Waste Bag	75,000
100,000	25,400	Solution Bag 1	25,600
		Solution Bag 2	45,600
		Solution Bag 3	25,400
		Waste Bag	100,000

판단된다. 따라서 재공품 재고의 허용개수를 0~4 lot로 통제하여 시뮬레이션을 반복 수행하였다. 즉, 작업 균형을 유지하기 위해 용액 파트와 센서 파트 Match 모듈에서의 대기행렬을 통제하였다. 결과는 Table 6에서 보듯이 재공품 재고의 허용개수 0 lot에 대한 카트리지 생산량이 가장 낮게 나타났다. 그 원인은 각 공정마다 작업시간 및 작업자의 할당인원이 모두 다르기 때문에 재공품 재고를 전혀 허용하지 않고 생산을 진행하였을 경우에는 여유시간 발생률이 증가하게 되고 이는 생산의 비효율성을 가져오는 결과로 나타나기 때문이다. Table 6에서 보듯이 재공품 재고의 허용개수 1~4 lot에 대한 카트리지 생산량은 비슷하게 나타났다. 실제로 본 연구 4장의 TOC 5 단계 분석에서도 재공품 재고를 1~4 lot로 변화 시키면서 분석하였는데 결과는 매우 비슷하였다. 즉 재공품 재고를 통제 할 경우에는 재공품 재고 lot 수에 따른 생산량 변화는 미미하다고 판단된다. 따라서 본 연구 4장에서는 지면 제약상 재공품 재고 lot 수가 2인 경우만을 제시하였다.

Table 6. Cartridge Production Amount When Inventory in Process Is Controlled

Input (EA)	Inventory 0 lot	Inventory 1 lot	Inventory 2 lot	Inventory 3 lot	Inventory 4 lot
20,000	20,000	20,000	20,000	20,000	20,000
30,000	30,000	30,000	30,000	30,000	30,000
50,000	27,800	31,800	32,400	31,800	32,200
75,000	27,800	31,800	32,400	31,800	32,200
100,000	27,800	31,800	32,400	31,800	32,200

4. TOC 5단계 분석

4.1 시스템의 제약을 찾아낸다.

1단계 시뮬레이션 수행결과 카트리지 생산량은 32,400개로 나타났으며 대상기업의 연도별 예상 판매량에 기초하여 볼 때 현재 공정으로 2013년도까지 생산이 가능하였다. Table 7과 Table 8을 살펴보면 용액파트의 생산공정이 제약공정임을 알 수 있다. 센서카드의 생산량은 49,000개, 용액백 Set의 생산량은 32,400개, 카트리지의 생산량은 32,400개로 나타났으며 카트리지 조립 파트 Match 모듈에서는 센서카드의 대기시간이 용액백에 비해 훨씬 큰 것으로 나타났다. 그것은 카트리지 조립을 위해 센서카드가 용액백 Set의 생산이 완료될 때까지 기다리는 것을 의미하고 이 과정이 반복될수록 센서카드의 재고가 증가하는 현상이 나타나게 된다. Table 7과 Table 8을 세부적으로 살펴보면 용액백 1과 용액백 3이 제약공정임을 알 수 있다. 용액백 1의 생산량은 32,600개, 용액백 2의 생산량은 33,000개, 용액백 3의 생산량은 32,400개, 폐기백의 생산량은 33,000개로 나타났으며 용액 파트 Match 모듈에서는 용액백 2와 폐기백의 대기시간이 용액백 1과 용액백 3에 비해 상당히 큰 것으로 나타났다. 그것은 용액백 Set가 카트리지 조립 파트의 Match 모듈로 이동하기 위해 용액백 2와 폐기백이 용액백 1과 용액백 3의 생산이 완료될 때까지 기다리는 것을 의미한다. 따라서 용액백 1과 용액백 3의 생산공정이 용액 파트의 병목임을 알 수 있다. 1단계 시뮬레이션 수행 결과 제약공정을 찾아낼 수 있었으며 2단계에서는 제약공정을 개선하여 생산량을 증가시키고 비용을 절감시켜 전체 생산성이 향상될 수 있도록 해야 한다는 결론이 도출되었다.

Table 7. Production Amount of Each Part (Step 1)

Part	Component	Output (EA)	Output (EA)
Sensor Card	Sensor 1	49,000	49,000
	Sensor 2	50,000	
Solution Set	Solution Bag 1	32,600	32,400
	Solution Bag 2	33,000	
	Solution Bag 3	32,400	
	Waste Bag	33,000	
QC Inspection	Sensor Card	49,000	49,000
	Solution Bag 1	32,600	32,600
	Solution Bag 2	33,000	
	Cartridge	32,400	32,400
Cartridge	Cartridge	32,400	32,400

Table 8. Waiting Time and Inventory (step 1)

Section		Waiting Time (hr)	Inventory (lot)
Cartridge Assembly Part Match Module	Sensor Card	886.14	36.3283
	Solution Bag Set	3.9614	0.1103
Solution Part Match Module	Solution Bag 1	7.7395	0.2165
	Solution Bag 2	75.6856	2.1261
	Solution Bag 3	9.6677	0.2691
	Waste Bag	97.4671	2.7335

4.2 계약을 최대한 철저히 활용한다.

2단계에서는 새로운 투자 없이 공정효율을 향상시키는 개선안을 제시하고자 한다. 1단계 시뮬레이션 수행 결과 용액 파트가 제약공정임을 찾아냈다. 그에 반해 센서 파트는 필요 이상으로 생산을 가동함으로써 센서카드의 과잉재고 결과를 초래하고 있음을 알 수 있었다. 즉 센서 파트는 용액 파트에 비해 높은 생산능력을 갖고 있다. 2단계에서는 비교적 생산능력이 높은 센서 파트의 작업자 자원을 용액 파트의 용액백 충전공정에 공유함으로써 용액 파트의 생산성을 높이고자 한다. 또한 용액 제조 작업자2명과 용액백 충전 작업자2명으로 역할이 구분되어있는 부분을 교육과정을 통해 통합작업을 실시하여 용액 파트의 생산성을 높일 계획이다. 시뮬레이션 모델에서 용액 파트의 작업자 자원의 용량을 통합하여 4명으로 변경하였으며 Set 모듈을 사용하여 센서 파트와 용액 파트의 작업자 자원을 공유하였다.

Table 9. Production Amount of Each Part (step 2)

Part	Component	Output (EA)	Output (EA)
Sensor Card	Sensor 1	43,200	43,200
	Sensor 2	45,000	
Solution Set	Solution Bag 1	41,400	41,000
	Solution Bag 2	41,800	
	Solution Bag 3	41,000	
	Waste Bag	41,600	
QC Inspection	Sensor Card	43,200	43,200
	Solution Bag 1	41,400	41,400
	Solution Bag 2	41,800	
	Cartridge	41,000	41,000
Cartridge	Cartridge	41,000	41,000

Table 10. Waiting Time and Inventory (step 2)

Section		Waiting Time (hr)	Inventory (lot)
Cartridge Assembly Part Match Module	Sensor Card	98.534	3.5601
	Solution Bag Set	14.085	0.4836
Solution Part Match Module	Solution Bag 1	29.9146	1.0272
	Solution Bag 2	63.1707	2.1660
	Solution Bag 3	10.1756	0.3477
	Waste Bag	80.4805	2.7644

Table 9와 Table 10의 결과를 보면 2단계에서는 카트리지의 생산량이 41,000개로 나타났으며, 2단계 개선 후에 1단계(현재공정)에서의 32,400개 보다 8,600개 증가한 것을 알 수 있다. 개선 전에 비해 생산성이 약 26% 증가하였다. 센서 파트의 작업자 자원과 용액 파트의 작업자 자원을 공유하고 용액 파트의 작업능력을 통합함으로써 전체 생산성이 크게 높아지고 센서카드의 과잉재고 현상도 많이 줄어들었다. 그러나 여전히 제약공정은 용액 파트로 나타났으며 세부 제약공정 역시 변함이 없었다. 용액 파트의 생산성을 높이기 위해서는 용액백 1과 용액백 3의 생산공정에 설비를 투자함으로써 전체 공정의 생산성을 높일 필요가 있을 것으로 판단된다.

4.3 비 제약 활동을 제약의 능력에 맞춘다.

3단계에서는 용액 파트의 생산공정이 제약공정이므로 다른 생산공정은 용액 파트의 생산공정에 맞춰 계획 실행되어야 한다. 특히 센서 파트의 공정들을 용액 파트의 스

케줄에 맞추고 자체 투입시기를 조절하여 관리함으로써 작업자의 공유가 좀 더 원활하게 이루어지도록 진행하고 센서카드의 과잉재고 현상을 방지하여 전체 공정의 생산성을 높여야 한다. 시뮬레이션 모델에서 센서 파트의 작업자를 좀 더 활용하고 센서카드의 과잉재고를 방지하기 위하여 카트리지 조립 파트 Match 모듈에서 센서카드와 용액백 Set의 재공품 재고를 통제하였다. 즉, 작업 균형을 유지할 수 있도록 대기행렬을 통제하였다.

Table 11과 Table 12의 결과를 보면 3단계에서는 카트리지의 생산량이 42,200개로 나타났으며, 3단계 개선 후에 2단계에서의 41,000개 보다 1,200개 증가한 것을 알 수 있다. 2단계에 비해 생산성이 약 3% 증가하였다. 센서 파트의 생산공정을 용액 파트의 생산 공정능력에 맞추어 자동함으로써 센서카드와 용액백 Set가 비슷하게 생산되었고 이에 따라 대기시간 및 재공품 재고가 적절하게 균형을 이루게 되었다. 그러나 작업자 공유의 활성화에 따라 생산량이 증가할 것이라는 기대와는 달리 제약공정

인 용액백의 생산량은 크게 변화가 없었다. 즉, 시뮬레이션 결과를 토대로 비추어 볼 때 전체 공정의 생산성 향상을 위하여 용액 파트에 대한 투자가 필요하다는 결론이 도출되었다.

4.4 제약의 능력을 확장, 개선한다.

4단계에서는 제약공정의 능력 확장을 위하여 투자를 통한 개선을 하고자 한다. 1단계에서 3단계까지 시뮬레이션 수행결과 제약공정은 용액 파트로 나타났으며, 세부 제약공정은 용액백 1과 용액백 3으로 나타났다. 개선 대안에 의해 생산량은 증가하였지만 여전히 제약공정은 변함이 없었으며 연도별 계획 생산량에도 크게 못 미치고 있는 수준이었다. 이에 따라 용액 파트의 설비투자를 통해 제약공정을 개선하여 전체 생산성을 향상 시키고자 한다. 제약공정인 용액백 1과 용액백 3의 생산공정은 다른 용액백에 비해 많은 시간이 소요되며 용액 파트의 작업자는 용액백 충전공정에 가장 많은 시간과 인원이 할당 된다. 따라서 현재 간이자동화 시스템으로 구성되어 있는 용액백 1과 용액백 3의 충전공정에 자동화 설비를 도입함으로써 제약공정을 개선하여 생산 효율성을 높이고자 한다. 용액백 1과 용액백 3의 충전공정에 자동화 설비를 도입할 경우 해당 공정의 Cycle Time과 필요작업인원은 다음과 같이 변화한다.

용액백 1의 충전공정은 작업시간이 7시간에서 3시간으로 감소하고, 필요작업인원은 2명에서 1명으로 감소한다. 용액백 3의 생산단위는 200개에서 400개로 증가하고, 라벨공정은 작업시간이 1시간에서 2시간으로 증가하며, 충전공정은 작업시간이 5시간에서 6시간으로 증가한다. 또한 충전공정의 필요작업인원이 2명에서 1명으로 감소한다.

위의 변경된 내용에 따라 시뮬레이션을 변경하여 수행하였으며 결과는 다음과 같다. Table 13과 Table 14의 결과를 보면 4단계에서는 카트리지의 생산량이 47,800개로 나타났으며, 4단계 개선(자동화 설비도입) 후에 3단계에서의 42,200개 보다 5,600개 증가한 것을 알 수 있다. 3단계에 비해 총 생산성이 약 13% 증가하였다. 제약공정인 용액백 1과 용액백 3의 충전공정에 자동화 설비를 도입함으로써 용액백 Set의 생산량이 49,800개로 3단계의 42,200개 보다 7,600개 증가하였으며 센서카드의 생산량 47,800개에 비해 2,000개가 더 생산되었다. 또한 카트리지 조립 파트 Match 모듈에서 센서카드의 대기시간 및 재공품 재고가 모두 0으로 나타났으며 센서카드 Match 모듈에서는 센서 1의 대기시간 및 재공품 재고가 모두 0으로 나타났다. 이는 카트리지 조립이 진행되기 위해 용

Table 11. Production Amount of Each Part (step 3)

Part	Component	Output (EA)	Output (EA)
Sensor Card	Sensor 1	43,000	43,000
	Sensor 2	44,000	
Solution Set	Solution Bag 1	42,600	42,200
	Solution Bag 2	43,000	
	Solution Bag 3	42,200	
	Waste Bag	42,800	
QC Inspection	Sensor Card	43,000	43,000
	Solution Bag 1	42,600	42,600
	Solution Bag 2	42,800	
Cartridge	Cartridge	42,200	42,200

Table 12. Waiting Time and Inventory (step 3)

Section		Waiting Time (hr)	Inventory (lot)
Cartridge Assembly Part Match Module	Sensor Card	22.3294	0.7958
	Solution Bag Set	36.019	1.2667
Solution Part Match Module	Solution Bag 1	10.0308	0.355
	Solution Bag 2	61.2983	2.1644
	Solution Bag 3	13.1611	0.4628
	Waste Bag	78.3365	2.7703

액백 Set가 센서카드의 생산이 완료될 때까지 기다리는 것을 의미하고 센서카드의 생산이 완료되기 위해 센서 2가 센서 1의 생산이 완료될 때까지 기다리는 것을 의미한다. 센서카드가 용액백 Set를 기다리는 경우는 전혀 나타나지 않았다. 즉, 용액 파트 Match 모듈에서 용액백 1의 대기시간 및 재공품 재고는 0으로 나타났지만 용액백 Set가 제약공정이 아니기 때문에 용액백 1을 병목으로 볼 수 없다.

위의 내용을 종합하여 볼 때 기존의 제약공정인 용액백 1과 용액백 3의 충전공정에 자동화 설비를 도입함으로써 제약공정이 센서 파트의 센서 1로 변화한 것을 알 수 있다. 즉 제약공정이 개선되었으므로 5단계에서는 다시 1단계로 돌아가 시스템을 점검하고 그에 따른 대안을 제시해야 한다.

Table 13. Production Amount of Each Part (step 4)

Part	Component	Output (EA)	Output (EA)
Sensor Card	Sensor 1	47,800	47,800
	Sensor 2	49,000	
Solution Set	Solution Bag 1	49,800	49,800
	Solution Bag 2	50,400	
	Solution Bag 3	50,000	
	Waste Bag	50,200	
QC Inspection	Sensor Card	47,800	47,800
	Solution Bag 1	49,800	49,800
	Solution Bag 2	50,400	
	Cartridge	47,800	47,800
Cartridge	Cartridge	47,800	47,800

Table 14. Waiting Time and Inventory (step 4)

Section		Waiting Time (hr)	Inventory (lot)
Cartridge Assembly Part Match Module	Sensor Card	0	0
	Solution Bag Set	190.35	7.7678
Solution Part Match Module	Solution Bag 1	0	0
	Solution Bag 2	57.5403	2.394
	Solution Bag 3	48.6613	2.0413
	Waste Bag	67.7419	2.8139
Sensor Part Match Module	Sensor 1	0	0
	Sensor 2	121.8	4.9528

4.5 제약이 개선되면 다시 1단계로 돌아간다.

5단계에서는 제약이 개선되었으므로 다시 1단계로 돌아가 시스템을 점검하여야 한다. 4단계에서는 자동화 설비의 도입을 통하여 제약공정이었던 용액 파트의 생산성이 크게 향상 되었고 그에 따라 제약공정은 센서 파트의 센서 1로 변화하였다. 그러므로 5단계에서는 센서 파트의 작업자 자원을 더 이상 용액 파트의 용액백 충전공정에 공유할 필요가 없다. 시뮬레이션 모델에서는 센서 파트의 작업자 자원을 용액백 충전공정에 공유하였던 Set 모듈을 해제하고 용액 파트의 작업자 자원만을 할당하였다.

Table 15와 Table 16의 결과를 보면 5단계에서는 카트리지의 생산량이 49,000개로 나타났으며, 카트리지의 생산량이 4단계 47,800개 보다 1,200개 증가한 것을 알 수 있다. 4단계에 비해 총 생산성이 약 3% 증가하였다. 센서

Table 15. Production Amount of Each Part (step 5)

Part	Component	Output (EA)	Output (EA)
Sensor Card	Sensor 1	49,000	49,000
	Sensor 2	50,000	
Solution Set	Solution Bag 1	49,800	49,800
	Solution Bag 2	50,400	
	Solution Bag 3	50,000	
	Waste Bag	50,200	
QC Inspection	Sensor Card	49,000	49,000
	Solution Bag 1	49,800	49,800
	Solution Bag 2	50,400	
	Cartridge	49,000	49,000
Cartridge	Cartridge	49,000	49,000

Table 16. Waiting Time and Inventory (step 5)

Section		Waiting Time (hr)	Inventory (lot)
Cartridge Assembly Part Match Module	Sensor Card	0	0
	Solution Bag Set	105.44	4.3183
Solution Part Match Module	Solution Bag 1	0	0
	Solution Bag 2	56.5161	2.3428
	Solution Bag 3	47.4839	1.9737
	Waste Bag	67.4234	2.8013
Sensor Part Match Module	Sensor 1	0	0
	Sensor 2	113.89	4.6985

파트의 작업자 자원을 더 이상 용액백 충전공정에 공유하지 않음으로써 센서카드의 생산량이 49,000개, 용액백 Set의 생산량이 49,800개로 비슷하게 균형을 이루게 되었다. 제약공정은 센서 파트의 센서 1공정으로 나타났으며, 이제는 다시 1단계로 돌아가 새로운 제약공정인 센서 파트의 센서 1 공정을 면밀히 분석하여 적절한 개선 대안을 찾아내야 한다. 2단계에서는 세부 제약공정의 개선을 통하여 전체 생산성을 높이는 선순환 연구가 계속해서 진행되어야 한다. 5단계의 시뮬레이션 결과를 분석해 보면 설비투자(자동화 설비도입)를 통한 용액 파트의 개선 효과는 높은 생산량을 나타내면서 2014년까지 인원충원 없이 생산이 가능한 것으로 나타났다. 하지만 설비투자에 대한 비용과 생산량 증대에 대한 경제성 분석이 추가로 필요할 것으로 판단된다.

4.6 경제성 분석

4, 5단계는 자동화 설비를 도입하였기 때문에 3단계에 비해 생산량이 크게 증가된 것을 알 수 있다. 하지만 자동화 설비 도입에 따른 경제성 분석이 필요하다. 본 절에서는 이러한 경제성 분석을 통해 자동화 설비 도입에 따른 타당성을 검증해 본다. 충전기 생산 전문업체 F기업이 제시한 용액백 1과 3의 자동화 설비 투자비용은 약 120,000,000원이며 대상기업은 자동화 설비를 도입함으로써 카트리지를 연간 6,800개 추가 생산할 수 있다.

대상기업의 카트리지 판매이익은 판매정책과 제품타입에 따라 발생하는 이익이 모두 다르기 때문에 판매단가에 대한 판매이익을 개당 최소 20,000원에서 최대 100,000원으로 분류하여 분석하였다. 분석결과는 Table 17과 같다. 자동화 설비도입에 대한 투자효과를 살펴보면, 최소 판매이익 20,000원으로 비교했을 때 연 추가이익은 136,000,000원으로 투자비용 120,000,000원에 비해 16,000,000원 정도의 이익을 보이고 있다. 이는 용액백 1과 용액백 3의 충전공정에 자동화 설비를 도입함으로써 생기는 이익이라 할 수 있으며, 자동화 설비 도입 후 1년 안에 손익분기점을 초과하고 있다고 할 수 있다. 또한 최대 판매이익 100,000원으로 비교했을 때 연 추가이익은 680,000,000으로 투자비용 120,000,000원에 비해 560,000,000원 정도의 이익을 보이고 있으며 이는 자동화 설비 도입 후 3개월 안에 손익분기점을 초과하고 있다고 할 수 있다. 따라서 대상기업은 연도별 예상 주분량에 따라 2014년에 자동화 설비를 도입한다면 2015년 안에는 손익분기점을 초과할 수 있을 것으로 본다.

Table 17. Economic Analysis

Sale Profit (Won)	Additional Output (EA)	Additional Profit (1,000 Won)	Investment Cost (1,000 Won)	Investment Profit (1,000 Won)
20,000	6,800	136,000	120,000	16,000
40,000	6,800	272,000	120,000	152,000
60,000	6,800	408,000	120,000	306,000
80,000	6,800	544,000	120,000	422,000
100,000	6,800	680,000	120,000	560,000

5. 결 론

TOC 제약이론의 집중개선 5단계와 공장자동화 전략을 기반으로 시뮬레이션을 설계하였으며 단계별로 대안을 제시하고 결과를 예측하여 분석하였다. 단계별 개선에 따라 증가된 카트리지 생산량은 Fig. 3과 같다.

1단계에서는 현 시스템의 제약공정을 발견하고 그에 따른 대안을 제시함으로써 2단계에서는 생산량이 크게 증가하였다. 3단계에서는 센서카드의 과잉재고 현상을 방지하였으며 4단계에서는 자동화 설비를 도입함으로써 제약공정이 크게 개선되었다. 5단계에서는 센서카드와 용액백 Set 작업이 균형을 유지하면서 생산성이 향상되었다. 4, 5단계는 설비를 도입하는 경우이기 때문에 이에 대한 경제성 분석을 실시하였으며 분석결과 2014년도에 자동화 설비를 도입한다면 2015년 안에는 손익분기점을 초과할 것으로 예상되었다.

공장자동화는 작업환경의 개선이나 불량품율의 감소, 제조시간의 단축 및 작업량의 증가 같은 정의 효과를 기대할 수 있지만 반대로 에너지 소비증가, 잉여 노동력의 해고 같은 부의 효과도 나타날 수 있다^[10]. 그러므로 무조건적인 공장자동화의 추진보다는 해당 공정의 작업특성을 고려하여 적정수준의 자동화를 통해 투자효과가 투자비용을 능가하는 최적의 공장자동화를 이룩하는 것이 필요하다. 추후 공장자동화의 도입에 따라 발생할 수 있는 잉여 노동력의 해고 같은 문제는 아웃소싱으로 생산되는 공정을 내부공정으로 전환하는 방안을 고려해 볼 수도 있다. 또한 본 연구에서는 현 상황에서 발생할 수 있는 기계고장 및 불량품 발생 같은 다양한 문제점에 대하여는 고려를 하지 않았기 때문에 추가적으로 고려할 필요가 있다. 그리고 모든 공정의 제약조건은 수시로 변하기 때문에 계속해서 지속적인 모니터링을 해야 하며 다시 1단계로 돌아가 새로운 제약공정에 대한 새로운 대안을 제시하

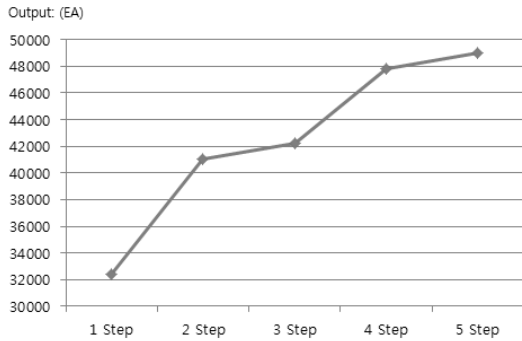


Fig. 3. Stepwise Increase in Production Amount

여 생산성을 증가 시킬 수 있는 선순환 연구가 반복되어야 한다. 위와 같은 부분은 적용상의 한계점으로 추후 연구로 남겨두고자 한다.

References

1. Kim, Y. W., "Market Trend and Export Expansion Strategy," pp. 35-60, 2008.
2. Park, J. H. and Park, H. Y., "Economies of Scale in the Korea Medical Device Industry," Korea Health Economy and Policy Society, Vol. 15, No. 1, pp. 21-40, 2009.
3. Kang, H. S., "Situation and Development Plan of Medical Device Industry," Korea Hospital Society, Vol. 39, No. 5, pp. 84-92, 2010.
4. Choi, K. S., Park, K. A., and Yun, Y. S., "A Methodology for Productivity Improvement Using Simulation Technique in Small and Medium Enterprise," Korea Industry Economy

- Society, Vol. 24, No. 4, pp. 1969-1987, 2011.
5. Lee, K. K., et al., "A Study on Improvement of a Production System in Small and Medium Sized Shoes Companies using Simulation," IE Interfaces, Vol. 18, No. 1, pp. 35-43, 2005.
6. Mun, H. S., "The Comparative Study of a Manual Assembly Line and Alternative Plans for the Productivity Improvement," Korea Productivity Society, Vol. 17, No. 3, pp. 55-71, 2003.
7. Chai, J. I. and Park, Y. B., "A Study on Throughput Increase in Semiconductor Package Process of K Manufacturing Company Using a Simulation Model," Korean Simulation Society, Vol. 19, No. 1, pp. 1-11, 2010.
8. Huh, T., et al., "A Simulation Study on the Manufacturing Process of Semiconductor Parts Using AHP," Korean Simulation Society, Vol. 18, No. 2, pp. 65-75, 2009.
9. Moon, J. C. and Rim, S. C., "A New Method of Profit Maximization Based on the Theory of Constraints," IE Interfaces, Vol. 14, No. 4, pp. 356-364, 2001.
10. Koh, S. G. and Kim, J. H., "Implementation of DBR System with Kanban in a Production Line of Static Demand," IE Interfaces, Vol. 15, No. 1, pp. 99-106, 2002.
11. Park, J. M. and Na, S. K., "Study on the Factory Automation Strategy and Outcome Measurements of Manufacturing Company," Korea Industry Economy Society, Vol. 11, No. 2, pp. 115-131, 1998.
12. Park, Y. H. "Empirical Study on the Effect of Factory Automation on the Productivity Improvement," Management Science Study, Kangwon National University, Vol. 8, pp. 67-79, 1998.
13. Park, Y. H., "Analysis of Factory Automation Based on the Stochastic Simulation," Fall Joint conference, Korea Industry Information Society, pp. 739-745, 1999.



맹 주 혁 (jhmaeng82@naver.com)

2007 청주대학교 환경공학과 학사

2013 서울과학기술대학교 정보산업공학과 석사

관심분야 : 모델링&시뮬레이션, 제약이론



이 강 원 (kwlee@snut.ac.kr)

1980 서울대학교 산업공학과 학사

1982 서울대학교 산업공학과 석사

1985 Kansas State Univ. U.S.A 산업공학과 박사

1989~현재 서울과학기술대학교 정보산업공학과 교수

관심분야 : 통신 및 네트워크 성능분석, O.R.