

DBR 시뮬레이션을 통한 Job Shop 시스템 분석

Job Shop System Analysis through DBR Simulation

심 윤 섭* 변 지 환** 황 순 현** 전 태 보***
Shim, Yun-Seop Byeon, Ji-Hwan Hwang, Soon-Hyun Jeon, Tae-Bo

Abstract

Simulation plays a pivotal role in the analysis of complex systems. In this study, a job shop manufacturing system has been analyzed through DBR (Drum-buffer-rope) simulation. Specific attention has been put to examine the rate of due-date achievement. We first derived key factors affecting the system performance. We then developed ARENA simulation program based on DBR of TOC (Theory of Constraints) concepts. Based on the performance measure, factors, and experimental design, we obtained the results. We have drawn meaningful results through examination of the results. The results obtained from this study may provide a good base for practical applications.

키워드 : 제약이론, *Drum-Buffer-Rope*, 제약, 현금창출률, 버퍼
Keywords : *Theory of Constraints, Drum-Buffer-Rope, constraint, throughput, Buffer*

1. 서론

생산 물류 시스템과 같은 복잡한 대형 시스템의 효율성 증대를 위한 분석 방법론은 크게 수리적 모형을 수립하여 이를 통해 최적화를 이루는 방법과 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 분야로 나뉜다. 수리적 모형을 통한 방법론은 복잡한 현실 상황을 모두 반영하기 위한 모형 수립이 까다롭고 문제의 크기가 커질수록 계산상 한계에 봉착하게 될 확률이 크다. 이에 반해 컴퓨터를 이용한 시뮬레이션 방법은 모형 수립부터 분석까지 다양한 패키지의 등장으로 인해 좀 더 손쉽게 간단하게 수행할 수

있는 장점을 가지고 있다.

제약이론(TOC: Theory of Constraints)은 비교적 최근에 소개된 방법론으로 여러 분야에 효과적으로 적용 가능하다. 불행히도 이의 이론적이고 수리적인 모형수립 및 분석이 쉽지 않으며 많은 실무자들에게 구체적인 모습으로 다가가지 못하는 경우가 많다. 제약이론의 여러 방법론들 중 생산시스템의 운영에 특히 효과적인 것이 DBR (drum-buffer-rope)이다. 이 방법론은 GM을 포함한 세계 여러 제조회사의 접목을 통하여 그 효과성이 검증되었다.

본 연구에서는 생산 시스템을 대상으로 제약이론을 통한 분석을 수행하고자 한다. 본 연구의 대상으로 하는 시스템은 기존의 문헌에 소개되어 있는 강남공업사[1]이다. 강남공업사는 job shop 형태로 운영되는 작업장이며 동기생산기법인 DBR 적용을 위해 소개된 시스템이다. 여기서는 이 시스템을 이용하여 실무에서 구체적으로 적용하고 분

* 강원대학교 산업공학과, 박사과정
** 강원대학교 산업공학과, 석사과정
*** 강원대학교 산업공학과, 교수, 공학박사, 교신저자

석하는 방법을 시뮬레이션을 통해 진행한다. 연구 수행을 위하여 2절에서는 강남공업사의 개요와 DBR 적용을 위한 내용을 설명하고, 3절에서는 2절의 내용을 토대로 DBR 시뮬레이션 모형을 수립한다. 4절에서는 수립된 시뮬레이션을 통해 실험을 수행하고 얻은 결과에 대한 분석을 한다. 5절에서는 결론 및 후후 연구에 대해 언급한다.

2. 시스템 개요 및 정의

강남공업사에서는 네 가지 종류의 제품(A,C,E,F)을 생산하며 각 제품에 대한 수요 및 판매가격은 표 1과 같다.

표 1 제품별 시장 수요 및 판매가격

	제품 A	제품 C	제품 E	제품 F
주당 수요	60개	90개	60개	30개
판매 가격	45만원	55만원	60만원	60만원

그림 1은 강남공업사에서 생산하는 제품들에 대한 BOM(Bill of Materials)을 도식화 한 것이다. 그림 맨 아래 부분은 원자재들을 나타낸다. 원자재의 개당 가격은 원자재 a는 10만원, b는 15만원, e는 10만원, f는 15만원, g는 10만원이며 공업사의 주당 운영비용은 4500만원이다.

이 시스템에는 총 6종류의 생산자원이 있으며 각 자원의 이용 가능시간과 준비시간(setup time)은 표 2와 같다. 공장의 가동시간은 주당 5일 일일 8시간 가동한다.

DBR 운영을 위한 첫 단계는 제약(constraint)의 발견이다. 표 3은 제약자원을 찾기 위해 각 자원별 시장수요를 달성하기 위한 요구가동률을 구한 결과이다. 자원의 요구가동률은 수요를 충족시키기 위한 필요작업시간을 자원의 이용가능시간으로 나눈 비율을 가리킨다. 언뜻 보면 요구가동률이 모두 100%미만이기에 때문에 제약자원이 없는 것처럼 보인다. 그러나 위에서 자원의 요구가동률을 계산할 때 작업준비시간을 넣지 않았다. 이 표에서 프레스가 가장 높은 가동율을 요하며 따라서 프레스가 제약자원이다.

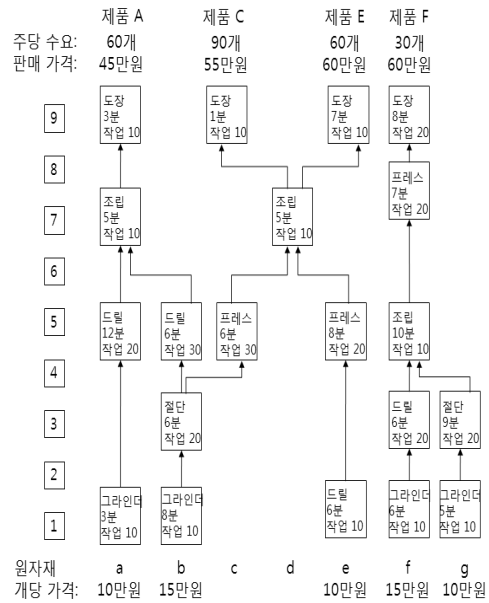


그림 1 제품별 BOM 구조

표 2 시스템의 생산자원

자원	수량	주당 가용시간	준비시간
프레스	1	2,400분	10분
도장	1	2,400분	60분
조립	1	2,400분	1분
절단	1	2,400분	30분
드릴	2	4,800분	60분
그라인더	2	4,800분	120분

표 3 자원별 요구 가동률

자원	필요 작업시간	이용 가능시간	요구 가동률
프레스	2,310분	2,400분	96.25%
도장	930분	2,400분	38.75%
조립	1,350분	2,400분	56.25%
절단	1,530분	2,400분	63.75%
드릴	2,160분	4,800분	45%
그라인더	2,190분	4,800분	45.625%

다음 단계는, 제약자원의 이용 가능시간을 최대한 효율적으로 사용하는 것이다. 이를 위해 제품들 중 제약자원 활용 시간당 예상되는 현금창출률(throughput)이 가장 높은 제품에 우선적으로 배분하여야 한다. 즉, 표 4와 같은 방법으로 생산 우선순위를 결정한다.

표 4 제품별 현금창출률과 우선순위

제품	현금창출률	제약자원 시간	현금창출률/제약시간	우선순위
C	55-(15+10) =30만원	14분	21,400원	3
E	60-(15+10) =35만원	14분	2,500원	2
F	60-(15+10) =35만원	7분	50,000원	1

우선순위를 바탕으로 대상 시스템의 부품 투입순서는 표 5와 같다. 표에서 보듯이 제품별 주문수량에 대한 생산량은 10개씩 lot로 나누어 생산하기로 하였다. 이유는 일회 생산량이 너무 클 경우 준비시간은 줄어들지만 프레스의 재고가 급격하게 변동할 위험이 있으며, 너무 적게 할 경우에는 준비작업이 자주 발생하여 전체 생산 시간을 초과하는 현상이 발생할 수 있기 때문이다. 또한, 제약자원인 프레스 공정의 버퍼(buffer)가 필요하며 여기서는 10시간 정도의 버퍼를 기준으로 운영한다. 참고로, 제품 A의 경우는 제약자원인 프레스 가공을 요하지 않는다. 이에 대한 고려 역시 필요하다. 최종공정인 도장(paint) 뒤에 별도의 버퍼로 운영함이 필요하다. 이에 대해서는 다음 절에서 설명한다.

표 5에서 input part index는 부품의 투입순서를 의미한다. 표 5 중앙의 음영표시 부분(투입순서 2-10)은 프레스의 초기 재고로 제품 E를 위한 재공품 c 70개와 F를 위한 재공품 f 20개를 의미한다. 투입순서가 1인 재공품 f는 도장공정의 초기 재고이고, 투입순서가 11인 재고품 e는 드릴공정의 초기 재고로 간주한다. 즉, 제약자원인 프레스 및 앞 뒤 공정의 초기 재고를 고려함으로써 시뮬레이션 초기에 프레스의 버퍼가 급격히 줄어드는 것을 방지하기 위함이다.

3. DBR 시뮬레이션 모형수립

본 연구에서는 전체적인 모형을 상세히 기술하기 보다는 TOC 적용을 위한 가장 중요한 부분인 프레스의 버퍼관리(buffer management)를 위한 모형의 설계에 대해서만 기술한다.

대상시스템의 물류 흐름을 분석해 보면 크게 2가지 경로로 대별된다. 첫째는, 제품 C, E, F들의 경로로 제약자원인 프레스를 거쳐서 생산되는 경우이다. 둘째는, 제품 A의 경로로 제약자원을 거치지 않는다. 제품 C, E, F의 경우 프레스는 10시간의 제약버퍼를 가지며 한 lot의 부품 생산을 마치고 프레스를 떠나면 즉시 생산지시상의 다음 원자재를 투입한다. 즉, 제약자원과 원자재 투입부분을 rope로 동기화 한다. 제품 A의 경우는 제약자원을 지나지 않으므로 마지막 도장공정 뒤에 출하버퍼(shipping buffer)를 가지며 C, E, F의 경우와 같이 원자재 투입부분과 rope로 동기화한다. 이상의 전체적인 내용이 그림 2에 도시되었다.

지정된 제약버퍼와 출하버퍼를 중심으로 시스템이 운영된다. 생산 흐름을 통제하기 위해 버퍼 크기를 3등분하여 관리를 수행한다. 어느 순간 버퍼의 양이 지나치게 감소/증가하면 원자재 투입의 변경을 통하여 관리할 수 있겠으나 여기서는 앞의

표 5 부품 투입 순서

제품	F						E								
	부품	f	f	f	c	c	c	c	c	c	e	e	e	e	e
수량	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
가공시간	70	70	70	60	60	60	60	60	60	80	80	80	80	80	
input part index	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15

제품	C																	
	부품	c	c	c	c	c	c	c	c	c	e	e	e	e	e	e	e	e
수량	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
가공시간	60	60	60	60	60	60	60	60	60	80	80	80	80	80	80	80	80	80
input part index	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33

비제약 공정들의 가공시간을 다소 늦추거나/서두르는 방법으로 조정함을 원칙으로 한다. 즉, 처음 설정한 10시간의 버퍼를 중심으로 1/3 경계를 벗어나면 10% 공정시간을 변경한다.

그림 3은 이상의 모든 내용들을 근간으로 작성된 ARENA[2] 시뮬레이션의 화면을 도시한다.

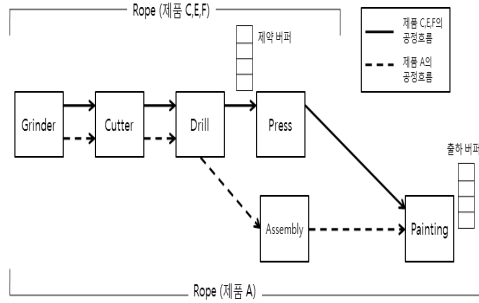


그림 2 강남공업사에 대한 DBR 운영

4. 실험 설계 및 분석

4.1 목적 함수와 독립변수

본 연구의 분석대상은 생산량, 가동률, 납기준수율 등 다양할 수 있다. 여기서는 DBR을 통한 관리에서 기대되는 납기의 준수 정도가 어느 정도인지를 보고자 함이며, 따라서 납기 준수율을 주된 분석대상으로 한다.

납기 준수율은 시스템 내에 내재된 여러 변수들에 종속이다. 즉, 납기 준수율을 최대화하기 위해 수반되는 인자들의 변화를 통한 최적 시스템을 설계 하려한다. 본 실험에 고려되는 인자는 준비시간, 자원의 고장간격 및 수리시간, 가공시간, 일일 작업시간, 가용자원의 추가 등 총 5가지이다. 이들 중 준비시간은 전체 생산에 큰 영향을 미치며 이의 개선이 시스템의 효율에 영향을 미칠수 있어 인자로 선정하였다. 자원의 고장간격 및 수리시간의 경우는 자원들의 수가 많아 모두 고려하여 고장률을 산출하기 힘들며, 모든 가용 자원의 고장률을 일괄적으로 개선한다는 전제 하에 고려영역을

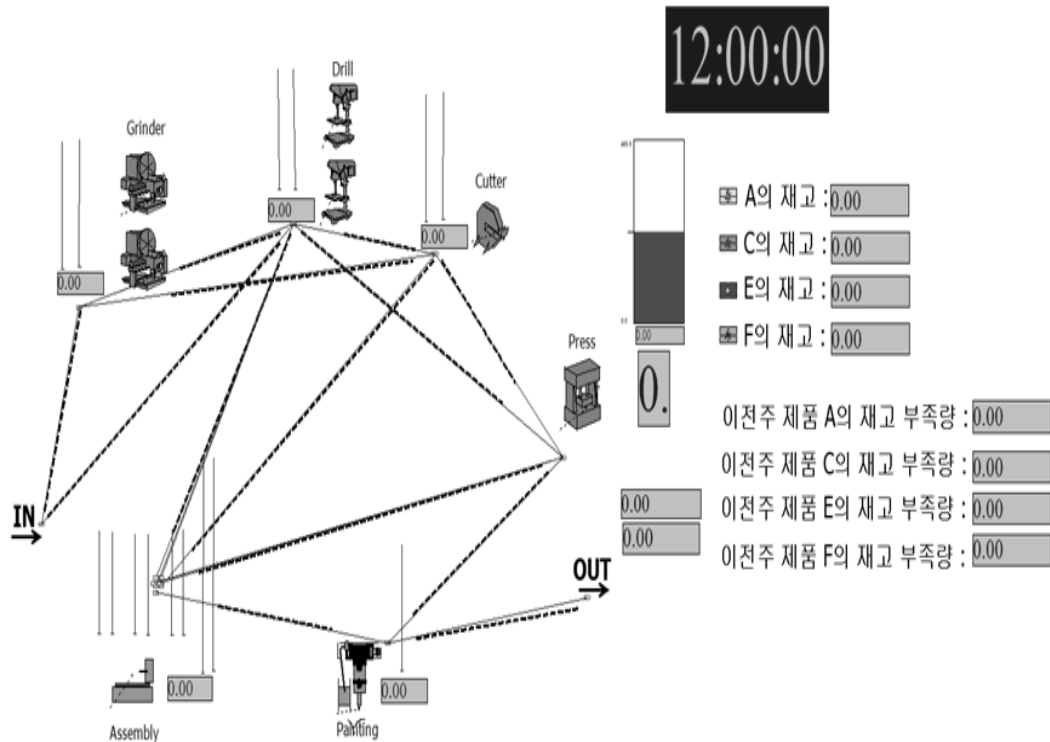


그림 3 강남공업사 시뮬레이션 Layout

설정하였다. 공정시간의 경우 프레스의 버퍼크기를 기준으로 약간씩 조절되도록 하였다. 일일 작업시간의 경우 원칙적으로 하루의 작업 시간을 늘렸을 경우 얼마나 납기준수율을 개선시킬 수 있는지 파악하기 위한 인자이며 하루 잔업을 2시간 추가 하여 그 효율을 파악하려 한다. 이상의 고려를 바탕으로 표 6에 인자들 값을 정의하였다.

합만을 이용한다. 본 연구에서는 특별히, $L_{16}(2^{15})$ 직교배열[3]을 이용하며, 총 16개의 조합당 5개씩의 관측치를 얻었다. 표 7은 선정된 직교배열에 의한 실험 결과를 도시한다. 이 표의 마지막 열은 S/N으로 납기준수율의 큰 값을 목표로 하기 위한 특성을 이용하여 다음의 공식으로 계산하였다.

$$S/N = -10 \log_{10} \left[\frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 \frac{1}{y_i^2} \right]$$

단, y_i ($i=1,2,\dots$)는 5가지 실험결과치들을 의미한다.

4.2 실험 설계 및 결과 분석

앞 절에서 선정한 5인자들을 이용한 시뮬레이션 실험을 실시하기 위하여 다음과 같이 실험설계를 한다. Full factorial design으로 요구되는 32개의 조합 중 1/2 실험법을 이용하여 총 16개의 조

표 6 시뮬레이션 수행을 위한 인자들의 수준

인자	변수명	입력변수	고려영역	수준 1		수준 2	
A	준비시간	커터	50% 감소	30분		15분	
		그라인더		120분		60분	
		드릴		60분		30분	
		어셈블리		1분		0.5분	
		페인팅		60분		30분	
		프레스		10분		5분	
B	고장시간	커터	Uptime(U500증가) Down time (U5감소)	UP time	Down time	UP time	Down time
		그라인더		U(2000,2500)	U(10,20)	U(2500,3000)	U(5,15)
		드릴					
		어셈블리					
		페인팅					
C	공정시간	조립	프레스 버퍼 800 이상	10% 증가		20% 증가	
		절단					
		드릴	프레스 버퍼 400 이하	10% 감소		20% 감소	
		그라인더					
D	작업시간	커터	작업시간 2 증가	8		10	
		그라인더					
		드릴					
		어셈블리					
		페인팅					
E	기계대수	그라인더	그라인더 1대 증가	2 대		3 대	
		드릴	드릴 1대 증가	2 대		3 대	

표 8은 얻어진 결과를 바탕으로 계산된 인자 수준별 평균 반응결과이다. 그림 4는 이 결과를 시각적으로 표현하기 위한 그림이다. 이들 결과로부터 인자 D와 A가 다른 인자들에 비해 결과치에 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 나머지 3개의 인자들은 우리가 고려한 영역내에서는 큰 영향을 미치지 않는다는 결론이다. 표 9 및 그림 5-14는 인자들간의 교호작용(interaction effect)을 고려하기 위한 것들이다. 이들로부터 AD를 제외하고는 교호작용이 없다는 판단이다. 이들 결과로부터 납기 준수율을 높이기 위한 최적 인자수준은 A_2, D_2 이다. 즉, 준비시간의 감소와 일일 작업시간의 증가(잔업)를 통하여 납기 준수율을 증가시킬 수 있다는 결론이다.

이상의 결과는 정상적인 작업으로는 납기 준수율이 낮을 수 있음을 의미하며, 주된 이유는 그라인더와 드릴이 비록 제약자원은 아니나 준비시간이 큼에 기인한다. 또한 A 제품의 경우 제약을 거치지 않는 이유로 생산 우선순위에서 밀려 작업이 늦춰져 궁극적으로 납기를 충족시키지 못한다. 이로 인해 전체적인 납기준수율을 또한 저하된다.

이제, 선정된 최적 인자 수준에서 기대되는 납기 준수율을 예측하자. 여기서는 3가지 경우에 대하여 예측을 수행하며 예상되는 납기준수율은 다음과 같다.

- a) A_1D_2 : 납기준수율 = 86.1%
- b) A_2D_1 : 납기준수율 = 69.4%
- c) A_2D_2 : 납기준수율 = 99.3%

표 8 인자수준별 S/N 평균반응 결과

인자 수준	A	B	C	D	E
1	25.44	31.98	31.47	24.54	32.29
2	38.38	31.84	32.35	39.28	31.53

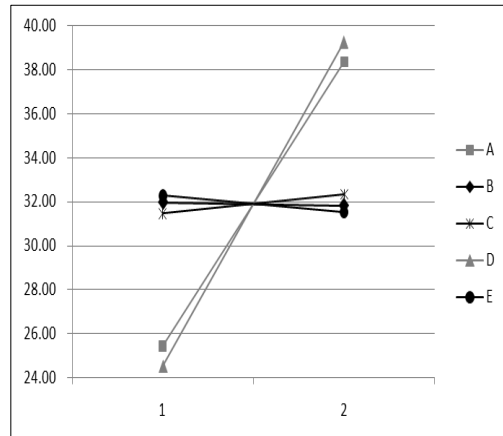


그림 4 인자수준별 평균반응그래프

표 7 실험조합 및 결과

조합	A	B	C	D	E	1	2	3	4	5	S/N비
1	1	1	1	1	1	5.00	5.25	4.50	4.25	5.75	13.74126
2	1	1	2	2	1	74.25	75.00	74.25	74.25	74.25	37.43125
3	1	2	1	2	1	74.25	75.00	74.25	75.00	74.25	37.44864
4	1	2	2	1	1	7.00	7.00	7.00	6.50	6.75	16.70232
5	2	1	1	2	1	99.75	98.75	98.75	99.75	99.75	39.94304
6	2	1	2	1	1	68.00	68.75	67.75	67.75	68.50	36.66886
7	2	2	1	1	1	65.75	66.50	66.00	66.00	67.00	36.42313
8	2	2	2	2	1	98.75	99.75	98.75	99.75	99.75	39.94304
9	1	1	1	2	2	99.50	98.50	99.50	98.25	98.50	39.89915
10	1	1	2	1	2	3.50	3.00	3.25	5.25	4.50	11.27165
11	1	2	1	1	2	1.75	1.75	18.00	10.75	2.00	7.376434
12	1	2	2	2	2	99.50	97.25	99.50	87.75	99.25	39.67271
13	2	1	1	1	2	71.75	71.75	72.75	65.00	72.25	36.96504
14	2	1	2	2	2	98.75	99.00	99.75	99.75	98.75	39.92996
15	2	2	1	2	2	98.75	99.00	99.75	99.75	99.75	39.94748
16	2	2	2	1	2	71.50	75.25	71.25	72.50	72.00	37.20177

표 9 두 인자들 간의 교호작용

A \ B	1	2	A \ C	1	2	
	1	25.59		25.30	1	24.62
	2	38.38	38.38	2	38.32	38.44

A \ D	1	2	A \ E	1	2	
	1	12.27		38.61	1	26.33
	2	36.81	39.94	2	38.24	38.51

B \ C	1	2	B \ D	1	2	
	1	32.64		31.33	1	24.66
	2	30.30	33.38	2	24.43	39.25

B \ E	1	2	C \ D	1	2	
	1	24.66		39.30	1	23.63
	2	24.43	39.25	2	25.46	39.24

C \ E	1	2	D \ E	1	2	
	1	31.89		31.05	1	25.88
	2	32.69	32.02	2	38.69	39.86

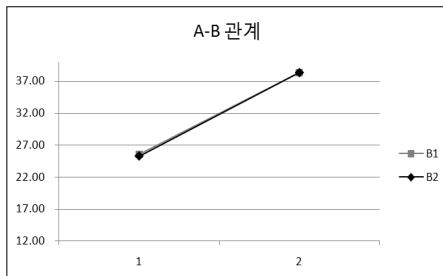


그림 5 인자A와 B의 교호작용 결과 그래프

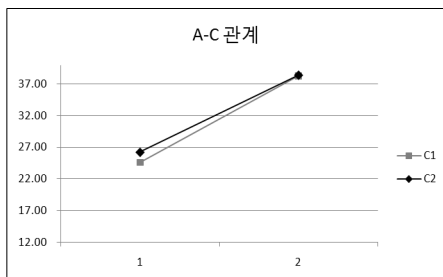


그림 6 인자A와 C의 교호작용 결과 그래프

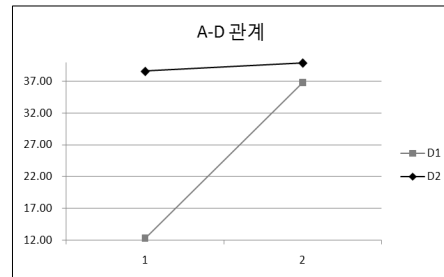


그림 7 인자A와 D의 교호작용 결과 그래프

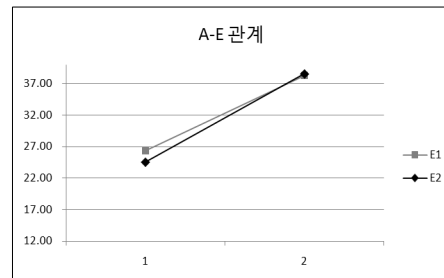


그림 8 인자A와 E의 교호작용 결과 그래프

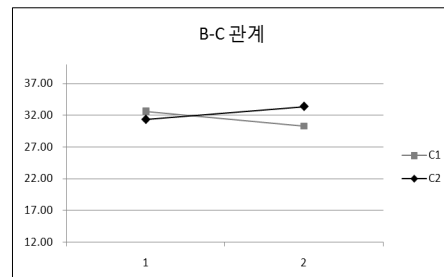


그림 9 인자B와 C의 교호작용 결과 그래프

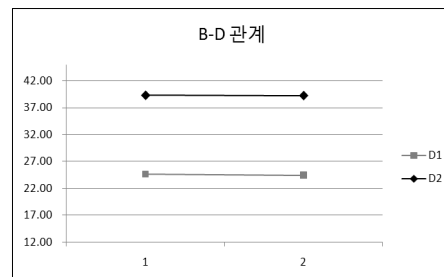


그림 10 인자B와 D의 교호작용 결과 그래프

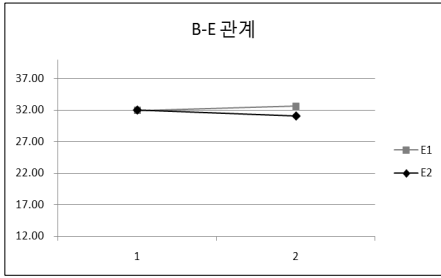


그림 11 인자B와 E의 교호작용 결과 그래프

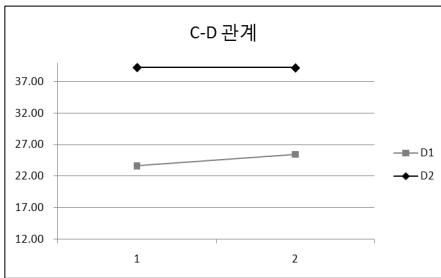


그림 12 인자C와 D의 교호작용 결과 그래프

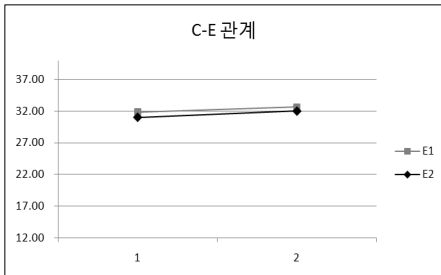


그림 13 인자C와 E의 교호작용 결과 그래프

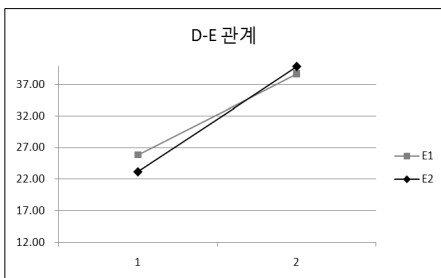


그림 14 인자D와 E의 교호작용 결과 그래프

5. 결론

본 연구에서는 job shop 형태로 운영되는 시스템을 대상으로 DBR 운영을 통한 납기준수를 평가를 수행하였다. 이를 위하여 ARENA 프로그램과 실험계획법을 활용하였다. 주요 인자들을 중심으로 분석을 수행하고 최적 조건을 도출하였다. 준비 시간의 단축이 납기 만족에 가장 요구되는 과제로 지적되었다. 본 연구의 결과가 실제 공정 운영상의 문제점 파악과 효율적인 대안의 도출이라는 측면에서 좋은 기여가 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 최광식, *기업희생을 위한 패스워드 TOC*, 한인출판사, 2001.
- [2] 문일경, 조규갑, 조면식, 최원준, *ARENA를 이용한 시뮬레이션(4판)*, 한국메트로힐(주), 2007.
- [3] Peace, G. S., *Taguchi method: a hands-on approach*, Addison-Wesley Publishing Company, Inc., 1993.