

Optimal Machine Operation Planning under Time-based Electricity Rates

Inho Kim · Changsoo Ok[†]

Industrial Engineering, Hongik University

시간대별 차등 전기요금을 고려한 최소비용 장비운용계획

김인호 · 옥창수[†]

홍익대학교 산업공학과

As power consumption increases, more power utilities are required to satisfy the demand and consequently results in tremendous cost to build the utilities. Another issue in construction of power utilities to meet the peak demand is an inefficiency caused by surplus power during non-peak time. Therefore, most power company considers power demand management with time-based electricity rate policy which applies different rate over time. This paper considers an optimal machine operation problem under the time-based electricity rates. In TOC (Theory of Constraints), the production capacities of all machines are limited to one of the bottleneck machine to minimize the WIP (work in process). In the situation, other machines except the bottleneck are able to stop their operations without any throughput loss of the whole manufacturing line for saving power utility cost. To consider this problem three integer programming models are introduced. The three models include (1) line shutdown, (2) block shutdown, and (3) individual machine shutdown. We demonstrate the effectiveness of the proposed IP models through diverse experiments, by comparing with a TOC-based machine operation planning considered as a current model.

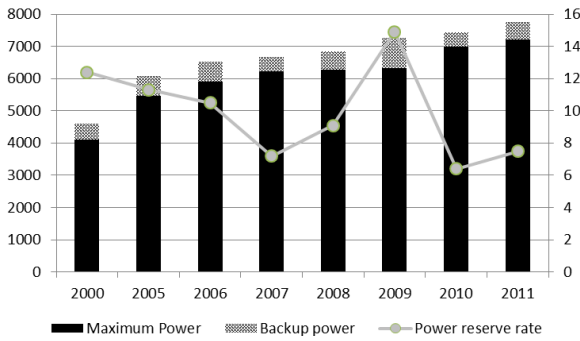
Keywords : Machine Operation Planning, Integer Programming, Time-based Electricity Rate, Theory of Constraints

1. 서 론

해마다 전력수요는 증가 하고 있다. 2000년 이후로는 최대 전력수요량이 발전설비 증설속도 보다 빠르게 증가 하면서 전력수급에 여유분이 점점 감소하고 있다. 2000년~2011년 기간 중에 하계 전력수요는 연평균 5.3% 증가하고 있고, 동계 최대 전력수요는 5.7% 증가한 반면에 발전설비용량은 연평균 4.6% 증가하는데 그쳤다[15]. 실제로 2010년 겨울 예비율이 최저 404만kw, 5.5%까지 떨어져 피크시간 대 전력부족으로 인한 블랙아웃의 가능성

이 커지고 있고, 이에 따라 피크시간의 전력 사용량을 줄이는 대책이 시급한 실정이다[10]. <Figure 1>은 지난 몇 년간의 최대전력과 공급예비력, 공급예비율을 그래프로 나타낸 것으로 최대 전력은 계속 커지고 공급 예비율은 점점 떨어지는 것을 볼 수 있다.

이와 같은 피크 시간대의 전력부족 문제는 다음 두 가지 방안을 통하여 해결될 수 있다. 먼저, 발전설비에 대한 투자를 확대하여 충분한 최대 발전량 확보하고 이를 통하여 피크 시간대의 전력 수요에 대비하는 방법이다. 그러나 이러한 접근방법은 막대한 건설비용이 요구되고 피크 시간 이외의 시간대에 발생하는 잉여전기로 인한 비효율이 발생하는 단점이 있다[5]. 두 번째는 시간대별 차등가격을 적용하여 부하가 많은 시간대의 전력 수요를 다른 시간대로 분산시키는 방법이다[1]. 계절별로 차등 요금을



<Figure 1> Annual Maximum Power, Backup Power and Power Reserve Rate[10]

적용하거나 심야 할인을 통한 심야전력 사용을 유도하는 방법, 미리 약정을 통하여 일정기간 일정량의 전력을 줄이면 요금을 경감해주는 제도도 여기에 해당된다. 미국 등 여러 나라에서 시간대별 차등 요금제와 피크타임 요금제를 도입으로 최대 전력수요를 효과적으로 관리하고 있으며 최근 실시간요금제의 도입도 적극 검토되고 있다[7].

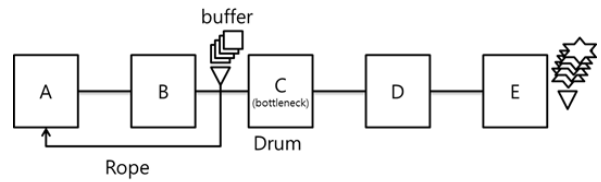
우리나라에서도 수요관리의 활성화와 실효성 강화를 위한 연구도 진행되고 있다[4, 9, 14]. 하계휴가나 설비보수기간을 최대전력량이 예상되는 기간에 시행하여 일정 전력량 이상 사용량을 줄이면 보상금을 주는 제도를 시행하여 이 효과에 대한 연구도 진행되었다[6, 13]. 또한 이 지원제도의 지원금에 따른 기업의 참여도가 달라진다는 연구결과도 있다[12]. 이와 함께 시간대별 차등 요금제에 대한 적극적인 도입도 함께 고려되고 있다[9, 14].

이와 같은 시간대별 차등 요금체계는 많은 전기를 사용하는 제조공장 입장에서 전기요금 절감을 위한 새로운 기회가 될 수 있고 이는 적절한 장비운용계획을 통해 달성될 수 있다. 예를 들어, 제조공장은 피크타임 또는 전기 요금이 비싼 시간대에 생산량을 낮춰 전력사용을 줄이고, 전기요금이 싼 시간대에 생산을 늘리면 생산 비용을 줄이면서 생산량을 유지하는 효과를 기대할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 최근 많은 제조업체에서 활용하고 있는 제약이론의 DBR 기법이 적용된 공장을 대상으로 시간대별 차등 전기요금 체계가 주어졌을 때 최소 전력 비용 장비 운용계획 문제를 다룬다. 다시 말해, 시간대별 차등 요금 체계가 주어졌을 때 산출량을 유지하면서, 전기요금을 포함한 생산비용을 최소화 하는 수리모형을 제안하고 그 효과에 대하여 설명한다.

2. Drum-Buffer-Rope(DBR)

Theory Of Constraints(TOC)는 Eliyahu M. Goldratt에 의해 제안된 기법으로 1984년에 출판한 Eliyahu M. Goldratt의 The Goal에서 처음 소개되었다. TOC는 시스템의 목



<Figure 2> DBR in A serial manufacturing line

표를 달성하는데 제약이 되는 요인을 개선함으로써, 단기간에 가시적인 경영성과가 얻고, 장기적으로는 지속적인 경영개선을 추구하여 시스템의 전체 최적화를 달성하는 프로세스 중심의 경영혁신 기법이다[2].

DBR의 구성은 다음과 같다.

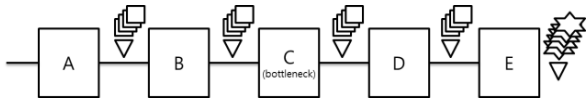
- 드럼(Drum) : 제약공정에 해당한다. 작업여부를 알려주는 역할을 한다.
- 버퍼(Buffer) : 제약공정 앞에 위치하며 완충역할을 한다.
- 로프(Rope) : 작업시기를 알려주는 역할을 한다.

TOC를 적용하는데 사용하는 기법 중 하나인 Drum-Buffer-Rope(DBR)은 전체 생산 흐름을 병목공정에 맞추어 중간에 불필요한 재고를 갖고 있지 않게 만든다. <Figure 2>는 일련의 공정에서 C가 병목공정일 경우에 Drum, Buffer, Rope의 위치를 나타낸 예시이다. 병목공정이 드럼이 되어 작업이 진행됨을 알리고, 버퍼가 일정수준 이상 차게 되면 로프를 이용하여 공정의 투입량을 조절한다. 이를 통해서 전체공정 안의 재고를 최소화 할 수 있고 이에 따라 생산성 향상과 생산 리드타임 감소, 재공품재고 감소 등의 효과를 확인 할 수 있었다[3]. 기존의 DBR에서 로프부분을 JIT(Just In Time)의 Kanban을 결합하여 사용하는 방법도 있다. JIT에서 재공품 재고를 줄이기 위해 사용하는 Kanban을 이용하여 DBR에서 로프가 하는 역할을 대신 할 수 있도록 제안하였다[8].

이러한 연구 외에도 버퍼를 드럼 앞에만 설치하는 것이 아니라 드럼 뒤에도 설치해서 병목공정 뒤의 공정에도 여유를 주는 연구도 진행되고 있다. 일련의 공정에서 병목공정 뒤에 버퍼를 추가함으로써 병목공정 이외의 모든 공정들의 생산 유연성을 확보하여 탄력적인 요금에도 효율적인 대처가 가능하게 한다[11].

3. 시간대별 차등 전기요금을 고려한 장비운용 계획 모형

시간대별 차등 전기요금제가 실시되면 어떤 시간에 제품을 생산하는 지에 따라 생산비용이 달라질 수 있으므로 이를 고려한 새로운 장비운용계획이 필요하다. 따라서 시간대별 차등 전기요금이 주어진 경우 산출량을 유지



<Figure 3> A Serial Manufacturing Line

하면서 생산비용 최소화를 위한 장비운용계획 모형을 제안하고 이를 설명하기 위하여 <Figure 3>과 같은 일렬 제조 공정을 고려한다.

본 논문에서는 단순한 제조공정을 대상으로 모형을 수립하고 있으나 모형과 결과에 변화 없이 보다 현실적인 다양한 제조 공정에도 적용이 가능하다. 장비운용 계획 모형의 수립을 위하여 다음을 가정한다.

- 모든 제품은 순차적으로 전 기계를 거쳐 완성된다.
- 특정시간 동안 가공 완료된 재공품은 로트단위로 후속 공정으로 전달되어 그 다음시간에 가공된다. 따라서, 후속 공정들은 즉시 가동 시작을 위하여 일정량의 기본 재고를 보유하고 이 재고량은 각 회사에서 채용하고 있는 재고 정책에 따라 결정된다.
- 고려하는 생산라인은 TOC 기법을 도입하여 재고량 최소화를 위해 모든 기계는 병목공정의 생산능력만큼 생산한다.
- 전기 사용 비용은 장비의 가동 시 고정비가 발생하고 생산량에 비례하여 변동비가 발생한다. 이 전기 비용 모형은 장비 전력 소비 패턴에 따라 다른 모형으로 대체될 수 있다.
- 최종재고는 초기 재고와 같다. 산출량을 유지하면서 비용 최소화하기 위해 재고를 활용하는 의사결정을 방지하기 위하여 장비 별로 최종 재고를 초기재고와 같도록 하여 순수 생산량을 통해 산출량을 유지하도록 한다.

주어진 가정을 바탕으로 본 연구에서는 전체 라인의 산출량을 유지하면서 비용을 최소화하는 문제를 다음 세 가지 모형으로 고려한다. 첫 번째는 라인 섷다운 모형으로 어떤 시간 동안 병목공정을 제외한 라인 전체가 정지할 것인지와 정지시간 동안 산출량 손실을 만회하기 위한 기계별 생산량을 결정하는 모형을 제시 한다(제 3.1절). 두 번째는 공정 블록 제어 모형으로 전체 공정을 병목 전 공정과 병목 후 공정으로 나누어진 각 그룹에 대한 정지시간 및 생산량을 결정하는 모형을 제안한다(제 3.2절). 마지막은 개별 기계 제어 모형으로 생산라인의 모든 장비를 개별적으로 제어하여 장비 별로 정지시간과 생산량을 결정하는 모형을 제시한다(제 3.3절).

3.1 라인 섷다운 모형

라인 섷다운 모형(Line Shutdown Model, LSM)은 생산

비용 절감을 위하여 병목공정을 제외한 모든 공정이 동시에 가동 혹은 정지되는 모형이다. 이 모형에서는 산출량의 유지하기 위해 병목공정은 계속 생산을 유지하는 반면 병목공정을 제외한 모든 공정 기계들이 동시에 정지하는 것을 고려한다.

3.1.1 Notations

최적화 모형 수립을 위해 필요한 변수와 파라미터 정의는 다음과 같다.

- $I_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 말 재고량
- $P_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 동안 생산량
- PC_j : 기계 j 의 최대생산용량
- Y_k : 기간 k 의 병목공정을 제외한 기계의 가동 여부
- SC_k : 기간 k 의 준비작업 발생 여부
- $TUC_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 의 발생 전력 비용
- $UCP_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 의 제품당 발생 전력비용
- UC_k : 기간 k 의 기계 가동시 발생 전력비용
- TT : 목표 산출량

3.1.2 재고량

최종공정기계를 제외한 기계 j 의 기간 k 의 재고량 $I_{j,k}$ 는 기계 j 의 이전 기간 $k-1$ 의 재고량 $I_{j,k-1}$ 과 기계 j 의 이번 기간 k 의 생산량 $P_{j,k}$ 와 합에서 다음기계 $j+1$ 의 이번 기간 k 의 생산량 $P_{j+1,k}$ 를 빼서 결정한다.

$$I_{j,k} = I_{j,k-1} + P_{j,k} - P_{j+1,k} \quad (1)$$

for $j = 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, 3, \dots, t$

3.1.3 완성품재고

최종공정기계 m 의 기간 k 의 기말재고 $I_{m,k}$ 는 최종공정기계 m 의 기간 k 의 생산량 $P_{m,k}$ 와 최종공정기계 m 의 이전기간 $k-1$ 의 재고 $I_{m,k-1}$ 의 합으로 나타낼 수 있다. 또한 최종공정기계의 기간별 기말재고는 그 기간까지의 전체 공정의 산출량 또는 완성품 재고를 의미한다.

$$I_{m,0} = 0 \quad I_{m,k} = P_{m,k} + I_{m,k-1} \quad (2)$$

for $k = 1, 2, \dots, t$

3.1.4 생산량 제약조건

모든 장비는 활용 가능한 재고보다 많이 생산할 수 없으므로 기계 j 의 기간 k 의 생산량 $P_{j,k}$ 는 선행 기계 $j-1$ 의 기간 $k-1$ 의 기말 재고량 $I_{j-1,k-1}$ 보다 작거나 같다.

$$P_{j,k} \leq I_{j-1,k-1} \quad (3)$$

for $j = 2, 3, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t$

병목기계는 기본 가정에 따라 항상 생산용량 PC_b 만큼 생산한다. 또한 기계 j 의 기간 k 의 생산량 $P_{j,k}$ 는 생산여부 Y_k 에 따라 0에서 기계 j 의 생산용량인 PC_j 까지만 생산할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{j,k} &= PC_b \quad \text{for } k=1, 2, \dots, t \\ y_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot Y_k \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \end{aligned} \quad (4)$$

3.1.5 준비비용

첫 기간에 생산준비가 필요한지를 나타내는 SC_1 은 기계들이 첫 기간에 생산 하는지를 나타내는 Y_1 를 따른다. 이후 기간 k 에 기계들이 생산준비가 필요한지 여부 SC_k 는 기간 k 에 가동을 했는지 여부 Y_k 와 이전기간 $k-1$ 에 가동을 했는지 여부 Y_{k-1} 와의 차를 통해서 알아 낼 수 있고, 이를 제약식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SC_1 &= Y_1, SC_k \geq Y_k - Y_{k-1} \\ \text{for } k &= 2, 3, \dots, t \end{aligned} \quad (5)$$

3.1.6 생산비용

생산비용은 앞에서 가정한 바와 같이 제품의 생산량에 따라 발생하는 가변 전력비용과 가동 시 발생하는 고정비용의 합으로 정의 한다. 제품의 생산량에 따라 발생하는 전력비용은 기계 j 의 기간 k 에 생산단위당 들어가는 비용 $UCP_{j,k}$ 와 생산량 $P_{j,k}$ 의 곱으로 나타내고, 가동 시 발생하는 비용은 기간 k 에 가동 시 발생비용 UC_k 와 기간 k 에 생산했는지 여부 Y_k 의 곱으로 나타낸다. 이 두 비용을 합하면 기계 j 가 기간 k 에 발생한 전력비용 $TUC_{j,k}$ 를 구할 수 있다. 병목기계 b 의 경우는 모든 기간 k 에 대해서 생산을 한다고 가정했기 때문에 병목기계 b 의 전력비용은 단위당 발생하는 비용 $UCP_{b,k}$ 와 생산량 $P_{b,k}$ 의 곱과 기간 k 에 가동 시 발생비용 UC_k 의 합으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot Y_k \\ \text{for } j \neq b, j &= 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ TUC_{b,k} &= UCP_{b,k} \cdot P_{b,k} + UC_k \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \end{aligned} \quad (6)$$

3.1.7 초기재고량

초기 재고량은 후행 기계가 바로 작업을 시작할 수 있도록 보유하는 재공품 재고로써 회사에서 채용하는 재고 정책에 따라 변경될 수 있다. 본 모형에서는 기계 j 의 초기재고량 $I_{j,0}$ 을 기계 j 가 불가피하게 생산을 하지 못하는 경우 다음기계 $j+1$ 이 최대생산력으로 n 기간 동안 생산할 수 있는 양으로 설정하고, 다음기계 $j+1$ 의 생산용량 PC_{j+1} 와 기간 n 의 곱으로 구할 수 있다.

$$I_{j,0} = n \cdot PC_{j+1} \quad \text{for } j=2, 3, \dots, m \quad (7)$$

모든 기간이 종료 된 후에 각 기계 j 가 가져야 할 재고 $I_{j,t}$ 는 기계 j 의 초기재고량 $I_{j,0}$ 보다 크거나 같아야 한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} I_{j,t} &\geq I_{j,0} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, \dots, t \end{aligned} \quad (8)$$

3.1.9 산출량제약

산출량을 보장하기 위하여 모든 기간이 종료된 후에 재고 $I_{m,t}$, 라인의 최종 생산량은 원하는 목표 산출량 TT 보다 크거나 같아야 한다.

$$I_{m,t} \geq TT \quad (9)$$

3.1.10 정수모형

앞에서 설명한 제약조건하에서 생산비용과 준비비용의 최소화를 목적함수로 하는 정수모형을 구성하면 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^t TUC_{j,k} + \text{라인셋업비용} \cdot \sum_{k=1}^t SC_k$$

subject to

$$\begin{aligned} I_{j,k} &= I_{j,k-1} + P_{j,k} - P_{j+1,k} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, 3, \dots, t \\ I_{m,0} &= 0 \quad I_{m,k} = P_{m,k} + I_{m,k-1} \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \\ P_{j,k} &\leq I_{j-1,k-1} \\ \text{for } j &= 2, 3, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t \\ P_{j,k} &= PC_b \cdot BT_k, BT_k = 1 \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \\ Y_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot Y_k \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ SC_1 &= Y_1, SC_k \geq Y_k - Y_{k-1} \\ BTSC_1 &= BT_1, BTSC_k \geq BT_k - BT_{k-1} \\ \text{for } k &= 2, 3, \dots, t \\ TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot Y_k \\ \text{for } j \neq b, j &= 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ TUC_{b,k} &= UCP_{b,k} \cdot P_{b,k} + UC_k \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \\ I_{j,0} &= n \cdot PC_{j+1} \quad \text{for } j=2, 3, \dots, m \\ I_{j,t} &\geq I_{j,0} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, \dots, t \\ I_{m,t} &\geq TT \\ Y_k, SC_k, BT_k, BTSC_k &: \text{binary for all } k \end{aligned} \quad (10)$$

3.2 공정 블록 제어 모형

두 번째로 공정 블록 제어 모형(Block Shutdown Model, BSM)은 병목기계를 기준으로 전후 공정을 각각 하나의 그룹으로 묶어 동시에 제어하는 모형이다. 라인 셋다운 모형과 다른 점은 정해진 시간에 병목기계를 제외한 모든 기계가 정지하는 것이 아니라 병목 이전그룹과 이후 그룹이 공정 상황에 따라 그룹별로 그룹 내의 모든 기계가 정지 혹은 가동을 결정하는 모형이다.

3.2.1 Notations

공정 블록 제어 모형을 위하여 추가로 다음의 변수를 도입한다.

- BtP_k : 기간 k 의 병목 이전그룹 가동여부
- BtN_k : 기간 k 의 병목 이후그룹 가동여부
- $BtPSC_k$: 기간 k 의 병목 이전그룹 준비작업 발생여부
- $BtNSC_k$: 기간 k 의 병목 이후그룹 준비작업 발생여부

3.2.2 생산량 제약조건

기계 j 의 기간 k 의 생산량 $P_{j,k}$ 는 생산여부 BtP_k, BtN_k 에 따라 0에서 기계 j 의 생산용량인 PC_j 까지만 생산할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} BtP_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot BtP_k & (11) \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, b-1, k = 1, 2, \dots, t \\ BtN_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot BtN_k \\ \text{for } j &= b+1, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \end{aligned}$$

3.2.3 준비비용

첫 기간에 생산준비가 필요한지를 나타내는 $BtPCS_1, BtNSC_1$ 은 첫 기간에 생산 하는지를 나타내는 변수 BtP_1, BtN_1 을 따른다. 블록 별로 기간 k 에 생산준비가 필요한지는 블록이 이전기간 $k-1$ 에 가동을 했는지, 기간 k 에 가동을 했는지를 통해서 알아 낼 수 있다. 이를 식 (5)를 변형하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} BtPSC_1 &= BtP_1, BtPSC_k \geq BtP_k - BtP_{k-1} & (12) \\ BtNSC_1 &= BtN_1, BtNSC_k \geq BtN_k - BtN_{k-1} \end{aligned}$$

3.2.4 생산비용

제품의 생산량에 따라 발생하는 전력비용은 기계 j 가 기간 k 에 생산 단위당 발생하는 전력비용 $UCP_{j,k}$ 와 생산량 $P_{j,k}$ 의 곱으로 나타내고, 기동 시 발생하는 전력비용은 기간 k 에 가동을 하면 기본적으로 들어가는 비용 UC_k 에

기계 j 가 기간 k 에 생산 했는지 여부 BtP_k, BtN_k 의 곱으로 나타낸다. 이 두 비용을 합하면 기계 j 가 기간 k 에 생산하면서 발생한 전력비용 $TUC_{j,k}$ 를 구할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot BtP_k & (13) \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, b-1, k = 1, 2, \dots, t \\ TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot BtN_k \\ \text{for } j &= b+1, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ TUC_{b,k} &= UCP_{b,k} \cdot P_{b,k} + UC_k \cdot BT_k \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \end{aligned}$$

3.2.5 정수모형

라인셋 다운 정수모형에 식 (11)~식 (13)을 대체하여 공정 블록 제어를 위한 정수모형을 수립하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } & \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^t TUC_{j,k} + \text{병목전 그룹 셋업비용} \cdot \left(\sum_{k=1}^t BtPSC_k \right) \\ & + \text{병목후 그룹 셋업비용} \cdot \left(\sum_{k=1}^t BtNSC_k \right) \end{aligned}$$

subject to

$$\begin{aligned} I_{j,k} &= I_{j,k-1} + P_{j,k} - P_{j+1,k} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, 3, \dots, t \\ I_{m,0} &= 0 \quad I_{m,k} = P_{m,k} + I_{m,k-1} \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \\ P_{j,k} &\leq I_{j-1,k-1} \\ \text{for } j &= 2, 3, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t \\ BtP_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot BtP_k \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, b-1, k = 1, 2, \dots, t \\ BtN_k &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot BtN_k \\ \text{for } j &= b+1, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t & (14) \\ TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot BtP_k \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, b-1, k = 1, 2, \dots, t \\ TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot BtN_k \\ \text{for } j &= b+1, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ I_{j,0} &= n \cdot PC_{j+1} \text{ for } j = 2, 3, \dots, m \\ I_{j,t} &\geq I_{j,0} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, \dots, t \\ I_{m,t} &\geq TT \\ BtP_k, BtN_k, BtPSC_k, BtNSC_k &: \text{ binary for all } k \end{aligned}$$

3.3 개별 기계 제어 모형

개별 기계 제어 모형(Individual Machine Shutdown Model, IMSM)은 각각의 기계가 자유롭게 원하는 시간에 정지

또는 작업을 할 수 있는 모형으로 각 기계는 자신의 정지 또는 가동을 결정한다.

3.3.1 Notations

개별 기계 제어 모형에서 추가로 사용되는 변수는 다음과 같다.

- $X_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 의 가동 여부
- $SC_{j,k}$: 기계 j 의 기간 k 의 준비작업 발생 여부
- S_j : 기계 j 의 셋업 비용

3.3.2 생산량 제약조건

라인 섀다운 모형의 식 (3)과 식 (4)를 수정하여 생산량 제약조건으로 표현하면 다음과 같다. 기계 j 의 기간 k 의 생산량 $P_{j,k}$ 는 생산여부 $X_{j,k}$ 에 따라 0에서 기계 j 의 생산용량인 PC_j 까지만 생산할 수 있다.

$$\begin{aligned} X_{j,k} \leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot X_{j,k} \\ \text{for } j \neq b, j = 1, 2, \dots, m, \\ k = 1, 2, \dots, t \end{aligned} \quad (15)$$

3.3.3 준비비용

기계별 기동 시 준비비용을 계산하기 위하여 식 (5)를 수정하여 제약식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} SC_{j,1} = X_{j,1} \\ SC_{j,k} \geq X_{j,k} - X_{j,k-1} \\ \text{for } j = 1, 2, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t \end{aligned} \quad (16)$$

3.3.4 생산비용

기계별로 가동 상태를 나타내는 변수 X 를 도입하고 식 (6)을 수정하여 생산비용을 계산하는 제약식으로 표현하면 다음과 같다. 제품의 생산량에 따라 발생하는 전력비용은 기계 j 가 기간 k 에 생산 단위당 들어가는 비용 $UCP_{j,k}$ 와 생산량 $P_{j,k}$ 의 곱으로 나타내고, 기동 시 발생하는 전력비용은 기간 k 에 가동을 하면 기동 시 발생하는 전력비용 UC_k 와 기계 j 가 기간 k 에 생산 했는지 여부 $X_{j,k}$ 의 곱으로 나타낸다. 이 두 비용을 합하면 기계 j 가 기간 k 에 생산하면서 발생한 전력비용 $TUC_{j,k}$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} TUC_{j,k} = UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot X_{j,k} \\ \text{for } j = 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \end{aligned} \quad (17)$$

3.3.5 정수모형

라인 섀다운 정수모형에 식 (15)~식 (17)을 대체하여 공정 블록 제어를 위한 정수모형을 수립하면 다음과 같다.

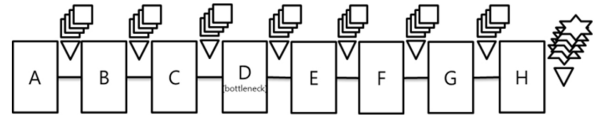
$$\text{Minimize } \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^t (TUC_{j,k} + S_j \cdot SC_{j,k})$$

subject to

$$\begin{aligned} I_{j,k} &= I_{j,k-1} + P_{j,k} - P_{j+1,k} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, 3, \dots, t \\ I_{m,0} &= 0 \quad I_{m,k} = P_{m,k} + I_{m,k-1} \\ \text{for } k &= 1, 2, \dots, t \\ P_{j,k} &\leq I_{j-1,k-1} \\ \text{for } j &= 2, 3, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t \\ X_{j,k} &\leq P_{j,k} \leq PC_j \cdot X_{j,k} \\ \text{for } j &\neq b, j = 1, 2, \dots, m \\ k &= 1, 2, \dots, t \\ SC_{j,1} &= X_{j,1} \\ SC_{j,k} &\geq X_{j,k} - X_{j,k-1} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m, k = 2, 3, \dots, t \\ TUC_{j,k} &= UCP_{j,k} \cdot P_{j,k} + UC_k \cdot X_{j,k} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m, k = 1, 2, \dots, t \\ I_{j,0} &= n \cdot PC_{j+1} \quad \text{for } j = 2, 3, \dots, m \\ I_{j,t} &\geq I_{j,0} \\ \text{for } j &= 1, 2, \dots, m-1, k = 1, 2, \dots, t \\ I_{m,t} &\geq TT \\ X_{j,k}, SC_{j,k} &: \text{binary for all } k \end{aligned}$$

4. 실험 분석

제 3장에서 제안된 정수모형에 대한 검증을 위하여 <Figure 4>의 A~H까지 총 기계 8대로 구성된 직렬 제조라인을 대상으로 실험을 실시한다. 각 기계 사이에는 작업을 끝낸 제품이 다음 공정을 기다리기 위한 버퍼가 존재하고 마지막 기계 H가 작업을 마친 제품은 완성된 제품으로 산출량으로 간주한다.



<Figure 4> A Serial Manufacturing Line with 8 Machines

4.1 모형별 성능 비교

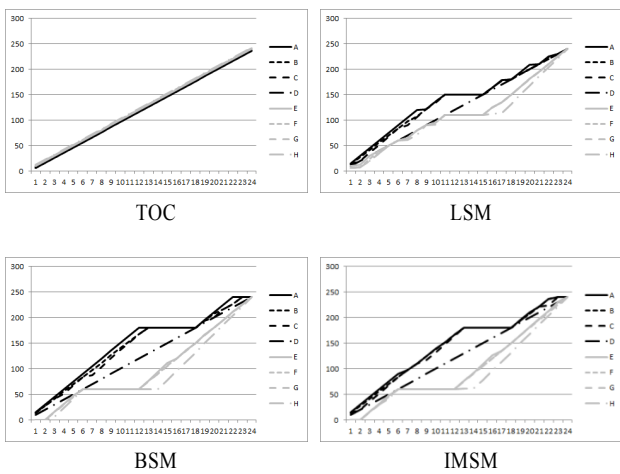
제 3장에서 제시된 3가지 모형들의 성능을 검증하기 위하여 기존 생산 정책(TOC)과 비교한다. 고려하는 각 기계의 생산능력은 <Table 1>과 같고 시간대별 단위 생산 전력비용은 <Table 2>와 같다. 이외에 생산을 위한 준

<Table 1> Production Capacities of Machines

Machine	1	2	3	4	5	6	7	8
Capacity	15	14	16	10	17	16	15	18

<Table 2> Utility Cost Over Time

Time	Unit Utility cost
midnight-6am	5
6am-6pm	15
6pm-midnight	5



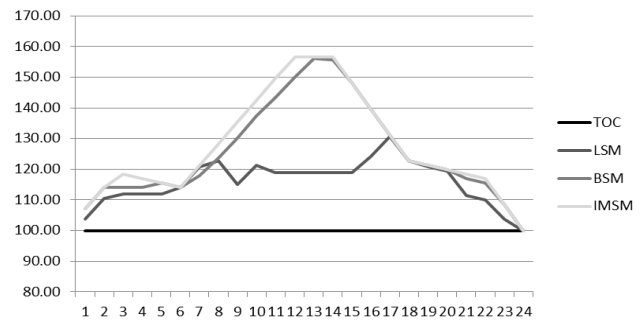
<Figure 5> Throughputs with TOC, LSM, BSM, IMSM over Time

비비용은 20으로 가정한다. 이 현장 환경 설정을 이용하여 제 3장에서 제시된 3가지 정수모형을 수립하고 해를 도출한다. 모형별 해에 따라 기계별 생산량을 시간별로 누적해서 그래프로 표현하면 <Figure 5>과 같다. TOC의 경우 모든 기계의 생산 속도가 동일하므로 시간 따른 기계별 누적 생산량이 같아지고 동일한 직선으로 표현된다. 반면, 나머지 세 경우에는 병목 공정 앞에 위치한 기계는 피크타임 전에 생산량이 높고 병목 공정 뒤에 위치한 기계는 전기 효율이 높은 시간대 뒤에 생산량이 높은 것을 볼 수 있다. 이는 병목 공정 앞에 위치한 기계들은 전기 효율이 높은 시간대에 가동 중지를 위하여 그 이전 시간에 재고를 미리 생산함을 의미하고 한편, 병목공정 뒤에 위치한 기계는 전기 효율이 높은 시간대에 정지 하면서 그 이후 시간에 병목기계가 생산 해놓은 재고를 처리하기 위해 생산속도를 높이는 것을 볼 수 있다.

<Table 3>은 각 모형 별 일일 생산 전기 비용과 재고량을 나타낸다. 여기에서 재고량은 시간별로 발생하는 재고량의 합으로 생산 시프트에 의해 일시적으로 증가하는 재고량을 반영한 값이다. 전기비용의 경우 기계제어의 단위가 작아질수록 최대 20%의 전력비용을 절감할 수 있

<Table 3> Utility Cost and Inventory with TOC and Three Models

	Utility Cost	Total Inventory
TOC	3384.40(100%)	3360(100%)
LSM	2969.04(87.27%)	5894(130.66%)
BSM	2749.04(81.23%)	6396(156.13%)
IMSM	2699.04(79.75%)	6486(156.60%)



<Figure 6> Inventory Rate Over Time with TOC and Three Models

는 반면 일시적 재고 수준은 최고 50~60% 증가됨을 볼 수 있다. 그러나 이 재고 증가는 <Figure 6>에서 보는 바와 같이 작업일 중간에 발생하는 일시적 재고 증가에 기인하고 일일 종료시점에 TOC와 같은 수준으로 떨어지므로 일일 산출량에는 영향을 주지 않는다.

4.2 제조 환경 변화에 따른 모형별 분석

제조 환경 변화에 따른 제안 모형의 효과를 검증하기 위하여 기계별 생산용량, 시간대별 전력 효율(UC), 기계별 전력 소비 패턴, 준비 비용(SC) 등의 값을 변화시키면서 제안된 세 모형에 대한 성능을 비교 평가한다.

4.2.1 기계별 생산용량

다양한 생산 용량에 대한 제안된 모형들의 성과를 분석하기 위하여 <Table 4>에 제시된 5가지 기계별 생산용량 분포를 고려한다. 이 실험을 위하여 시간대별 전기 요금은 <Table 5>의 UC2를, 준비비용은 20을 각각 사용한다. <Table 6>은 TOC와 제안된 세 모형에 대한 총 비용과 TOC 방법대비 비용 비율을 나타낸 표이다. 시나리오에 따라 10~20%의 비용 개선 효과가 있음을 알 수 있고 기계별 생산 능력에 차이가 큰 CAPA5의 경우가 가장 높은 개선 효과를 보인다. 이는 병목기계 전후에 배치된 기계들이 상대적으로 높은 여유 생산능력을 보유하면 전기 비용 절약을 위해 정지한 기계시간 동안의 산출량 손실을 그 외 시간에 효과적으로 보충할 수 있음을 의미한다.

<Table 4> 5 Scenarios for Production Capacity

Machine	Capacity				
	CAPA1	CAPA2	CAPA3	CAPA4	CAPA5
1	16	16	15	15	15
2	15	13	11	11	14
3	18	18	16	16	16
4	10	10	10	10	10
5	17	17	17	17	17
6	15	15	16	16	16
7	11	11	15	13	15
8	16	16	18	18	18

<Table 5> 3 Time-Based Utility Costs

	UC1	UC2	UC3
Midnight-6am	10	5	5
6am-9am	10	15	5
9am-3pm	10	15	25
3pm-6pm	10	15	5
6pm-midnight	10	5	5

<Table 6> Total Costs with Capacity types

	CAPA1	CAPA2	CAPA3	CAPA4	CAPA5
TOC	3430	3454	3430	3454	3384
LSM	3335	3372	3318	3362	2969
	(0.97)	(0.98)	(0.97)	(0.97)	(0.88)
BSM	3080	3221.5	2990	3175	2749
	(0.90)	(0.93)	(0.87)	(0.92)	(0.81)
IMSM	3007	3104	2888	3037	2699
	(0.88)	(0.90)	(0.84)	(0.88)	(0.80)

4.2.2 시간대별 전력 효율

요금제에 따른 모형의 성능평가를 위해 <Table 5>에 제시된 세 가지 전력 효율을 고려한다. 이 실험을 위해서 기계별 생산능력은 <Table 4>의 CAPA5를, 준비비용으로는 20을 각각 사용한다. 주어진 전력 효율에 대한 각 모형별 총비용과 TOC 대비 비용 비율은 <Table 7>과 같다. 제어 범위가 클수록 시간대별 전력 효율의 차이가 클수록 비용 절감 효과가 크며 최대 35%의 전력비용 절감 효과가 나타난다.

4.2.3 장비 전기 소비 패턴

장비의 생산량에 따른 소비 전력은 장비 유형에 따라 다르므로 본 실험에서는 다양한 장비 전기 소비 패턴에

<Table 7> Total Costs of Four Models with Three Utility Cost Distribution

	UC1	UC2	UC3
TOC	3390.40	3384.40	3384.40
LSM	3250.40	2969.04	2433.59
	(0.96)	(0.88)	(0.72)
BSM	2890.40	2749.04	2242.48
	(0.85)	(0.81)	(0.66)
IMSM	2850.40	2699.04	2181.37
	(0.84)	(0.80)	(0.64)

<Table 8> Total Costs of Four models with Energy Consumption Patterns

	Fixed	Variable	Mixed
TOC	2080.0	1464.4	3384.4
LSM	1800.0(0.87)	1369.8(0.94)	2969.0(0.88)
BSM	1580.0(0.76)	1369.8(0.94)	2749.0(0.81)
IMSM	1530.0(0.74)	1369.8(0.94)	2699.0(0.8)

따라 제안하는 모형의 성능을 평가한다. 고려하는 전기 사용 패턴은 다음과 같다. 첫 번째는 하나라도 생산을 할 경우 시간당 발생비용이 고정적으로 발생 하는 경우, 두 번째는 생산하는 개수의 비율에 따라 발생비용이 변하는 경우, 마지막은 앞의 두 경우를 혼합한 형태로 고정비와 변동비가 발생하는 경우이다. 이 세 가지 패턴에 대한 4 가지 모형에 대한 전력 사용 비용은 <Table 8>과 같다. 개별 기계 제어 모형 기준으로 TOC 대비 80%~90%의 비율을 차지하는 것을 볼 수 있다. 고정비용의 경우는 라인 셋다운 모형은 개선효과가 거의 없지만 공정 블록 제어 모형이나 개별 기계 제어 모형에서는 가장 큰 효과를 보이는 것을 볼 수 있다. 개별 기계 제어 모형의 경우 TOC 대비 52%~84%의 비율을 보이는 것을 볼 수 있다. 변동비용의 경우 세 가지 비용 산출 방법 중 가장 낮은 개선효과를 보인다. 개별 기계 제어 모형의 경우 TOC 대비 93%~95%의 비율을 보인다. 3가지 비용 산출 모형에 대해서 모든 모형이 비용이 감소하는 효과를 나타난다.

4.2.4 준비비용

본 연구에서 제안하는 모형들은 사용 전력비용을 절감하기 위하여 장비의 정지를 고려하는데 이 때 재가동 시 발생하는 준비비용은 전력비용 절감 효과를 약화시키므로 본 실험에서는 준비비용이 각 모형에 미치는 영향을 분석한다. 고려하는 준비비용은 10, 20, 40이다.

<Table 9> Total Costs with Three Setup Costs

	10	20	40
TOC	3304.40	3384.40	3544.40
LSM	2784(0.84)	2969(0.88)	3296(0.93)
BSM	2599(0.79)	2749(0.81)	3049(0.86)
IMSM	2544(0.77)	2699(0.80)	2999(0.85)

<Table 9>는 기계별 생산능력은 CAPA5, 시간대별 전력 효율은 UC2일 경우 모형별 비용과 TOC 대비 비용 비율을 나타낸 표이다. 결과를 보면 SC가 증가하였기 때문에 전체 비용에 대한 절대적인 수치 비교는 의미가 없지만 비용절감 비율을 고려하면 준비비용이 증가할수록 개선효과가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 준비비용이 높은 경우 장비 정지하는 것보다 계속 운영하는 편이 비용 측면에서 유리한 상황이 존재하였음을 의미한다.

5. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 시간대별 다른 전력 요금제가 주어졌을 때 산출량은 유지하면서 전력비용을 최소화하는 문제를 고려하였다. 다양한 공장 상황을 반영하기 위하여 전력 효율이 높은 시간대에 공장 전체의 정지를 고려하는 경우, 병목 기계 전후를 나누어 정지를 고려하는 경우, 기계별 정지를 고려하는 경우 세 가지 경우에 대한 정수모형을 수립하였고 이 모형들을 검증하기 위하여 다양한 기계별 생산용량, 시간대별 전력 효율(UC), 기계별 전력 소비 패턴, 준비 비용(SC) 값에 대하여 실험을 실시하였다. 실험 결과는 제안된 모형들이 모든 현장 상황에 대하여 큰 비용 절감효과를 보이고 있으며 공정 기계들의 제어에 대한 자유도가 높은 모형일수록 높은 개선 효과를 확인할 수 있었다.

본 연구에서 제안된 시간대별 차등 전기요금을 고려한 장비 운영계획을 위한 정수모형은 직렬 제조라인을 대상으로 수립되었다. 이는 보다 다양한 제조환경을 고려하기 위해 TOC 이론에서 제안한 A자형 라인, T자형 라인으로 확대 적용이 필요하다. 또한, 향후 모형의 결과를 실제 제조 현장에 적용하여 모형의 우수성을 검증하는 것이 필요하다.

Acknowledgement

This work was supported by 2012 Hongik University Research Fund.

References

- [1] Do, Y.B., Need for electric power demand management and management skills, Policy data of Korea.
- [2] Goldratt, E.M. and Cox, J., *The Goal*, North River Press.
- [3] Jung, N.K., Case studies of TOC implementations, The Korean Operations Research and Management Science Society, 2006 Spring Conference.
- [4] Kim, J.H., Hong, J.H., and Kim, H.J., A New DSM Administrative Structure for Efficient Implementation. *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2008, p 71-73.
- [5] Kim, K.S., Park, J.I., and Park, C.S., A study on Changing Pattern of Short-run and Long-run Electricity Demand in Korea. *The Korean Institute of Electrical Engineers*, 2008, p 435-438.
- [6] Kim, S.D., Kim, Y.S., and Lee, W.J., The effect of summer peak demand reduction programs. *Environmental and Resource Economics Review*, 2008, Vol. 17, No. 2, p 213-233.
- [7] Ko, D.S., The implications of Real Time Pricing with U.S. case, Korea Institute for Industrial Economics and Trade, Issue Paper 2010-259.
- [8] 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, p 99-106.
- [9] Lee, D.W., ECA Rule Based Lighting Control System for Energy Saving. *The Korean Institute of Information Technology*, Vol. 22, No. 12, p 1-12.
- [10] Lee, G.D., Strengthening of power demand management for power supply demand stability. *Journal of the Electrical World*, 2012, Special Issues 7.
- [11] Ok, C.S. and Park, J.I., A Conceptual Approach for Managing Production in Consideration of Shifting Electrical Loads, Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2014 (Accepted).
- [12] Park, J.J., Kim, H.W., and Kim, J.O., A Study on the Participation depending on the rebate changes in the DSM, *Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers*, Vol. 22, No 10, p 18-23.
- [13] <https://www.kdrm.or.kr>.
- [14] <http://www.kepco.co.kr>.
- [15] <http://www.kpx.or.kr>.