

# 작업시간과 육체적인 작업부하를 고려한 혼합모델 조립공정의 라인밸런싱

문성민 · 권근섭 · 최경현<sup>†</sup>

한양대 산업공학과

## Line Balancing for the Mixed Model Assembly Line Considering Processing Time and Physical Workloads

Sung Min Moon · Keunseob Kwon · Gyunghyun Choi

Department of Industrial Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791

Line Balancing is the problem to assign tasks to stations while satisfying some managerial viewpoints. Most researches about the Mixed-Model Line Balancing problems are focused on the minimizing the total processing time or the number of workstations. Independently, some research reports consider the balance issues of the physical workloads on the assembly line. In this paper, we are presenting a new mathematical model to accomplish the line balance considering both the processing time and the workloads at the same time. To this end, we propose an zero-one integer program problem, and we use the Chebyshev Goal Programming approach as the solution method. Some computational test runs are performed to compare the pay-offs between the processing time and the workloads. And, the test results show us that the reliable balanced work schedules can be obtained through the proposed model.

**Keywords:** Mixed-Model Line Balancing, processing time, physical workloads, Chebyshev Goal Programming

### 1. 서론

라인밸런싱 문제는 특정 목적에 맞도록 작업장에 작업을 할당하는 문제이다. 그리고 혼합모델 조립라인은 공장부지, 시설 등의 투자를 줄이고 시설의 효율적인 이용을 위하여 한 라인에서 유사한 여러 모델을 생산하는 조립라인이다. 특히 본 연구에서는 기존 연구의 주요 쟁점이었던 작업시간의 평활화뿐만 아니라 작업장에서 발생할 수 있는 육체적인 작업부하의 평활화를 목적으로 하는 혼합모델 조립라인 밸런싱(MMALB; Mixed-Model Assembly Line Balancing) 문제를 다룬다.

전통적인 조립라인들은 단일 제품을 대량생산하기 위해 설계되었다. 시대가 흘러 고객의 다양한 요구가 생기고 기호가

변화하면서 제품의 종류는 증가하였다. 현재 대부분의 조립생산 공장은 혼합모델 조립라인에서 하나 이상의 기본모델을 가지고 다양한 종류의 모델을 생산하고 있다. 그리고 조립라인은 모든 라인에 일정한 속도로 움직이는 컨베이어가 존재하는 라인이거나 일정 부분만 일정한 속도로 움직이는 컨베이어가 존재하는 라인 중의 하나로 구성되어 있다. 이것은 단일모델 환경을 위하여 설계되고 잘 운용되었다. 하지만 다양한 종류의 모델을 생산하기 위한 혼합모델 환경에 있어서 라인밸런싱은 기존의 연구에서처럼 단순히 사이클타임이나 작업장 수를 최소로 하는 작업편성을 할 경우 라인의 효율적인 운용이 어려워진다. 이것은 모델별로 생산량과 총 작업시간이 다르고 작업내용, 작업방법, 작업을 할 때 이용하는 설비 및 치공구가

<sup>†</sup>연락처 : 최경현 교수, 133-791 서울시 성동구 행당동 17번지 한양대학교 산업공학과, Fax : 2295-8049,

E-mail : ghchoi@hanyang.ac.kr

2004년 2월 24일 접수, 1회 수정 후 2004년 4월 26일 게재 확정.

다르기 때문이다. 단지 하나의 모델을 생산하는 단일모델 조립라인과는 달리 다양한 모델을 생산하는 혼합모델 조립라인의 경우에는 작업자에게 발생하는 작업부하가 제품의 생산량과 품질에 큰 영향을 미친다. 따라서 본 연구에서는 모든 작업의 작업시간을 고려하여 작업을 균등하게 할당하는 것뿐만 아니라 특정 작업을 수행함에 있어 작업자에게 발생할 수 있는 육체적인 작업부하까지도 균등하게 분배하고자 한다.

본 연구에서는 MMALB 문제를 위한 새로운 접근방법을 제안한다. 작업시간을 이용하여 작업을 균등하게 할당하고자 했던 기존 연구의 목적뿐 아니라 작업을 작업장에 할당할 때 작업자가 육체적으로 피로를 느끼는 것을 막을 수 있도록 육체적인 작업부하를 고려함으로써 전체적인 작업부하를 균등하게 분배하고자 한다. 이와 같이 육체적인 작업부하를 고려하는 것은 전체 공장의 생산성 향상 및 제품의 품질에도 기여한다. 왜냐하면 작업장에서 작업을 하는 작업자가 육체적, 환경적인 요인으로 인해 과부하되는 것은 반복 조립작업의 능력과 효율을 떨어뜨리며 곧바로 공장의 전체 생산성 및 제품의 품질에 영향을 주기 때문이다. 그래서 작업자에게 영향을 미칠 수 있는 육체적인 작업부하를 생각하게 된 것이다. 또한 혼합모델에 있어서 모델의 순서를 결정하는 것도 작업부하에 영향을 미친다. Thomopoulos(1970)는 각 모델을 기준으로 하여 작업장에 작업량을 균형 있게 다루는 것의 이점을 설명하고 있다. 본 연구에서도 이것의 중요성을 감안하여 각 모델별 라인밸런싱을 고려했다. 만약 모델별로 작업장에 할당된 작업량의 차가 크고, 작

업량이 많은 모델이 라인에 연속적으로 투입되면 작업장에서 작업을 하는 작업자에게 과부하가 발생하게 되어 생산이 원활하게 이루어지지 않을 것이다. 특히 모델의 순서를 결정하는 문제에 있어 위와 같은 문제가 발생하는 것은 사이클타임을 각 모델마다 다르게 하지 않고 모든 모델에 동일하게 하는 고정 사이클타임 방식을 적용하였기 때문에 나타나는 현상이다. 작업장에 할당된 모델별 작업량이 다르기 때문에 순서결정을 잘 하지 않으면 작업장 간 작업량의 불균형을 초래하게 되며, 이는 작업능률의 저하 및 라인 운용의 효율성을 떨어뜨리게 된다. 따라서 각 모델별로 작업량을 평활화하는 것을 목적식에 고려하고자 한다.

MMALB 문제는 단일모델과는 여러 면에서 다르다. 특히 혼합모델 조립라인에서 라인은 계절적인 변화나 제품의 라이프 사이클로 인하여 일 년에 한두 번씩 새롭게 밸런싱되어야 한다. 그리고 라인은 모델을 조합하는 데 있어 매일의 변화 또는 계절적인 변화를 다루기에 충분할 만큼 안정적이어야 한다. 또 하나의 다른 점은 선행공정도(Precedence Diagram)이다. 단일모델의 경우, 단 하나의 제품만을 생산하기 때문에 별 문제가 되지 않는다. 하지만 MMALB는 각 모델에 따라 작업의 수와 종류가 다르기 때문에 모든 모델에 공통적으로 적용할 수 있는 선행공정도가 필요하다. 만약 여러 모델에 동일한 작업을 여러 작업장에서 분산하여 작업을 하게 된다면 작업장의 효율을 저하시킬 뿐 아니라 시설에 대한 투자비용이 더 소요된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 각 모델의 선행공정도의 유사성을

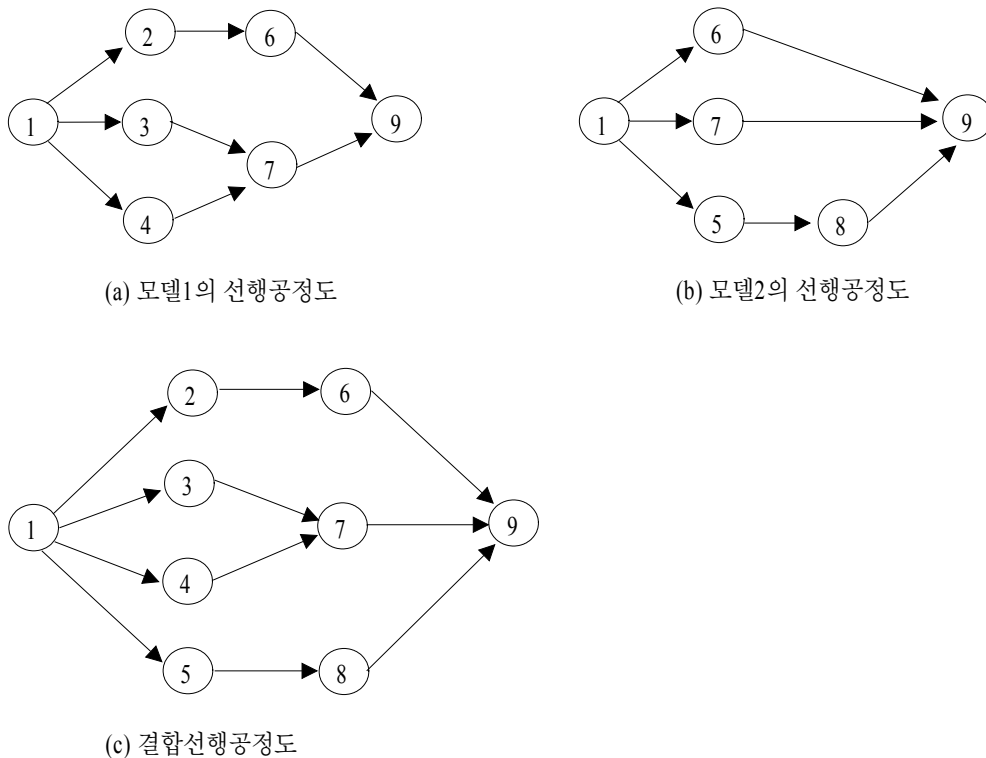


그림 1. 모델별 선행공정도 및 결합선행공정도.

활용해야 한다. Thomopoulos(1970)는 모든 모델을 하나의 단일 모델로 변형하기 위하여 결합선행공정도(Combined Precedence Diagram)를 최초로 사용했다. 결합선행공정도는 각 모델별로 작업의 선후관계를 나타내는 선행공정도를 하나의 선행공정도로 통합하여 나타낸 것이다. 즉, 모든 모델의 선행공정도에 나타나 있는 선행관계와 작업을 나타내는 노드를 결합함으로써 만들 수 있다. MMALB에서는 이와 같은 결합선행공정도를 사용하여 각 모델의 작업 선행관계를 하나로 나타냄으로써, 모든 모델이 하나의 결합선행공정도를 사용하도록 하였다. 예를 들어, 모델에 대한 선행공정도를 나타낸 <그림 1>의 경우(Erel and Gokcen, 1999)에 (a), (b)는 각 모델의 선행공정도이고 (c)는 이를 결합한 결합선행공정도이다.

## 2. 관련 연구

혼합모델 라인밸런싱 문제는 다양한 조립생산 공장에서 많이 다루어지고 있는 문제이다. 하지만 실제 조립라인의 모습을 반영한 혼합모델 라인밸런싱에 관한 연구는 많이 이루어지지 않았다. 혼합모델을 고려한 대부분의 연구들은 결합선행공정도를 사용하여 혼합모델 문제를 단일모델 문제로 변환하여 문제를 풀고 있다. 혼합모델 라인밸런싱 문제를 풀기 위하여 사용한 결합선행공정도는 Thomopoulos(1967)에 의해서 최초로 사용되었다. 단일모델과 혼합모델의 중요한 차이점은 다양한 모델에 공통인 작업이 혼합모델에 존재한다는 것이다. 대부분의 연구에서는 다양한 모델에 대해 공통인 작업을 같은 작업장에서 수행하도록 가정하고 있다. Roberts and Villa(1970)는 작업장의 수를 고정시킨 후 유휴시간을 최소화하는 정수계획모형을 최초로 모델링하였다. Erlebacher *et al.*(1991)은 작업장에 할당된 작업을 조합으로 묶은 후 작업할당을 평가할 수 있는 방법을 모델링하였으며, Berger *et al.*(1992)는 사이클타임을 고정시키고 작업장을 최소화시키는 알고리즘을 개발하였다. Hsu(1992)는 작업장에서 발생하는 비용과 과부하를 최소화하기 위한 방법론을 개발하였고 Matanachai and Yano(2001)는 모델조합의 변화에도 작업시간이 안정적으로 분배되는 방법론을 개발하였다.

Hagberg *et al.*(1995)은 평활화된 조립라인을 구축하는 데 있어 작업시간만을 고려하는 것은 작업자가 육체적으로 과부하되어 잠재적인 직업성 상해를 유도한다는 결론을 얻어냈다. 이렇게 잠재적으로 발생할 수 있는 질환을 예방하기 위하여 Carnahan *et al.*(2001)은 단일모델에서 사이클타임을 최소화하기 위한 작업할당문제에 육체적인 수요를 결합시킴으로써 라인밸런싱을 하는 알고리즘을 개발했다. Carnahan *et al.*(2001)의 연구에서는 작업에 대한 육체적인 수요를 악력의 힘으로 표현하여 라인밸런싱을 하고 있다. Chen *et al.*(1994)는 작업부하에 가장 많은 영향을 미치는 요인들을 정의한 후 인간공학적 측면에 있어서 작업부하의 수준을 예측하는 모형을 개발하였다. 또한 Jung and Jung(2001)은 작업부하의 요인을 결정된 후 작업

자의 전체 작업부하 수준을 평가하는 방법을 개발하였다.

혼합모델을 풀기 위한 방법으로서 Berger *et al.*(1992)는 혼합모델 라인밸런싱을 위하여 Branch and Bound 알고리즘을 사용했다. 그리고 Erel and Gokcen(1999)는 유휴시간을 최소화시키기 위하여 최단경로모형을 제시하였다. 또한 Gokcen and Erel(1997)는 목표계획법을 사용하여 다수의 목표를 만족시키는 라인밸런싱을 하였다.

기존 연구에서 볼 수 있듯이 작업시간 또는 육체적인 작업부하만을 고려하여 혼합모델 라인밸런싱 연구를 하였다. 따라서 본 연구에서는 혼합모델 라인밸런싱을 하기 위하여 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하고자 한다.

## 3. 문제 정의

본 연구에서 다룬 조립라인은 MMAL이다. MMAL은 라인의 성과가 작업량의 평활화 하나만으로는 완전하게 측정될 수 없기 때문에 단일모델 조립라인(SMAL; single model assembly line)보다 좀더 복잡하다. 본 연구에서는 작업자에게 영향을 미치는 작업 및 작업장에서 발생하는 육체적인 작업부하를 고려하여 라인의 효율을 높이고자 한다. 몇몇의 중요한 성과기준은 모델 투입순서의 성능에 의존하며, 투입순서는 라인밸런싱 결정에 의해 영향과 제약을 받는다(Thomopoulos, 1967, 1970).

실제 조립라인 측면을 고려한 논문의 대부분은 MMALB 문제를 SMALB 문제로의 변환을 근간으로 하여 문제를 풀고 있다. 혼합모델과 단일모델의 주요한 차이 하나는 여러 개의 모델에 공통인 작업이 존재한다는 것이다. 대부분의 경우 여러 모델에 공통적으로 속한 작업은 같은 작업장에서 수행되어진다고 가정한다. 이것에 대한 실질적인 이유는 작업자 훈련에 있어서의 효율성, 라인 주변의 부품저장소, 부품의 공급 등이 있다. 단지 작업시간으로 인한 작업량의 평활화에만 관심이 있다면 단일모델에서 사용된 많은 절차들을 사용하여 사이클타임을 최소화하거나, 작업장의 수를 최소화하는 문제에 적용될 수 있을 것이다. 하지만 본 연구에서는 기존의 연구와는 달리 여러 모델에 공통인 작업도 다른 작업장에서 작업을 수행할 수 있다고 가정하고 있다. 왜냐하면 본 논문의 가장 큰 목적은 작업량뿐 아니라 실제 조립생산 라인에서 발생할 수 있는 육체적인 작업부하를 함께 고려하여 작업자에게 과부하를 일으킬 수 있는 다양한 원인을 줄여줌으로써 작업자가 직업성 상해에 걸릴 위험을 최소화하는 것이기 때문이다. 만약 모든 모델에 공통인 작업을 하나의 작업장에서만 수행한다면 그 작업자는 다른 작업장의 작업자에 비해 쉬지 않고 계속해서 작업을 수행해야 한다. 그렇게 된다면 작업자는 과부하에 걸리게 되고 직업성 상해를 입을 것이다. 따라서 여러 모델에 공통인 작업의 경우 비교적 육체적인 작업부하가 적은 다른 작업자가 작업을 수행하는 것을 가능하게 함으로써 전체적인 작업부하의 평활화

를 이룰 수 있기 때문에 이와 같은 가정을 한 것이다.

위의 내용처럼 본 연구에서 다른 MMALB 문제는 SMALB 문제보다 복잡하고 어렵다. 따라서 다음과 같은 문제의 환경을 가정한 후 MMALB 문제에 접근하고자 한다.

- (1) 조립라인은 일정한 속도로 움직이는 컨베이어가 존재하며, 여러 모델은 일정 간격으로 투입된다.
- (2) 작업장의 수는 외부적으로 명시되어 있다. 또한 최적의 대안을 결정하기 위하여 다른 작업장의 수에도 적용될 수 있다.
- (3) 사이클타임은 미리 결정되어 있으며 모든 모델에 적용 가능한 고정 사이클타임이다.
- (4) 모델별 작업의 작업시간과 선행공정은 미리 결정되어 있다. 특히 작업시간의 경우 모델별로 작업시간이 존재한다.
- (5) 모든 모델의 선행공정이 고려된 결합선행공정도를 사용한다. 비록 모든 작업이 모든 모델에 요구되어지는 것은 아니라 하더라도 결합선행공정도는 모든 모델의 선후관계를 나타내기 위하여 사용된다.
- (6) 각 모델별 작업은 하나의 작업장에서만 작업이 수행된다.
- (7) 각 작업장은 모든 작업을 수행할 수 있다.
- (8) 작업장에는 1인의 작업자가 배치되어 작업이 수행된다.
- (9) 작업자의 이동시간은 무시한다.
- (10) 제품을 작업하기 위한 작업 준비시간은 무시한다.
- (11) 작업장들의 중간에 존재하는 공정재고의 한계는 무한하다고 가정한다.

본 연구에서는 다른 연구에서 고려하지 않은 실제 조립생산 공장에서 발생하는 육체적인 작업부하를 고려하였다. 육체적인 작업부하는 다양한 작업 및 작업환경에 의해서 발생된다. 작업과 작업환경에 대한 정의를 다르게 한다면 여러 분야의 조립생산 공장의 모습을 나타낼 수 있을 것이다. 이것은 본 연구에서 제안하는 모델이 모든 조립생산 공장의 라인밸런싱 문제에 적용될 수 있음을 나타낸다. 또한 작업시간을 고려한 작업량의 평활화까지 고려함으로써 이전 연구의 목적까지 충족시킬 수 있다. 따라서 작업 및 작업환경으로 인한 육체적인 작업부하가 여러 분야의 조립생산 공장을 표현할 수 있도록 육체적인 작업부하의 요인을 결정하는 것은 매우 중요하다. 본 연구에서 사용하게 될 육체적인 작업부하의 요인은 인간-기계 시스템에서 다양한 직업에서 나타나는 육체적인 작업부하에 가장 많은 영향을 미치는 작업부하 요인을 발견하기 위한 많은 연구들(Ayoub *et al.*, 1983; Grandjean, 1985; Adams, 1988; Hancock, 1989b; Sanders and McCormick, 1992)의 결과를 바탕으로 한 것이다. 그리고 Jung and Jung(2001)이 종합해 놓은 육체적인 작업부하의 요인을 사용하였다. 본 연구에서 사용하게 될 육체적인 작업부하의 요인에 대한 내용은 다음과 같다.

첫 번째 요인은 육체적인 작업의 수요에 의해 발생하는 육체적인 작업부하이다. 손으로 작업물을 다루는 것과 같은 육체적인 활동들의 수요로부터 발생하는 작업부하이다. 이 작업부하

에 영향을 주는 위험요소로는 작업물의 무게, 작업물을 들어 올리고 내리는 횟수, 육체적인 활동의 지속 정도, 작업을 할 때 움직이는 거리 등이 있다. 특히 작업자의 질환에 가장 큰 영향을 주는 위험요소는 작업자가 다루는 작업물의 무게라는 사실에는 대부분의 사람들이 동의할 것이다. 매우 무거운 작업을 반복해서 하게 된다면 쉽게 질병에 노출되기 때문이다. 대부분의 논문에서는 작업물의 무게만을 가지고 작업을 단순하게 “가볍다, 보통이다, 무겁다”로 구분하고 있다. 그리고 Chaffin *et al.*(1975), Kosiak *et al.*(1968), Rowe *et al.*(1971) 등은 무거운 작업을 하는 사람이 가벼운 작업을 하는 사람보다 질병에 걸린 횟수가 더 많음을 발견했다. 작업물을 들어올리고 내리는 횟수는 분당 작업의 횟수로 정의된다. 근골격계에 의해 행해진 작업은 직접적으로 작업자에게 영향을 미친다. Chaffin *et al.*(1975)은 들어올리고 내리는 횟수와 속도, 시간과 질병과의 관계에 대해서 연구를 했다. 작업물을 들어올리고 내리는 횟수가 높으면 높을수록, 시간이 길면 길수록 질병발생률이 높아짐을 알 수 있다. 이것은 반복적으로 작업물을 들어올리고 내리는 작업이 작업자로 하여금 쉽게 질환에 노출되게 하여 근육이나 뼈에 손상을 가져오게 되는 잠재성을 가지고 있음을 보여준다. 작업물을 들어올리고 내릴 때 자재의 움직이는 거리는 신진대사의 에너지 소비를 일으키는 주요한 원인으로 인식되어 있다. 또한 NIOSH(1981)에 의하면 신진대사의 에너지 소비는 자재의 움직이는 거리가 증가하게 되면 증가한다고 나와 있다. 따라서 위에서 정의하는 네 가지 위험요소에 의해 발생하게 되는 육체적인 작업부하를 본 연구에서 고려하였다.

두 번째 요인은 환경적인 원인에 의해 발생하게 되는 육체적인 작업부하이다. 적당하지 않은 온도, 빛, 소음, 진동, 화학약품에 노출 등을 포함한 작업환경으로부터 발생하게 되는 작업부하이다. 공장의 작업조건하에서 환경적인 원인으로 인한 생리학적인 결과는 많은 연구자들에 의해 연구되었고 Grandjean(1985)에 의해 종합되었다. 부적절한 작업환경에서 나오는 강하고 반복되는 자극은 작업자의 평형성을 방해하며 작업자가 질병에 걸릴 가능성과 사고의 발생률을 높여준다.

세 번째 요인은 몸의 동작과 자세로 인해 발생하는 육체적인 작업부하이다. 작업을 할 때의 부적절한 몸동작과 자세로 인하여 발생하게 되는 작업부하이다. 서있는 자세로, 몸을 구부린 자세로, 몸을 엎드린 자세로, 몸을 비튼 자세로 작업을 하는 것이 원인이 된다. Grandjean(1985)은 바람직하지 못한 자세와 질병의 위험 사이의 관계를 표로 나타냈다. 예를 들어, 한 곳에 너무 오랫동안 서서 작업을 하는 것은 다리와 무릎에 질병을 일으킬 수 있다.

위에서 정의한 육체적인 작업부하에 영향을 주는 요인에 대한 위험요소들은 각각이 5가지 비율로 나타나는 단위(5-point scale)와 5가지 언어학상의 변수집합(linguistic variable sets)의 하나의 값으로 나타낼 수 있다. 5가지 비율은 5가지 언어학상의 변수값에 맞도록 0과 1 사이의 값을 5등분한 것으로, 본 연구에서는 0과 1 사이의 값을 무작위로 발생시켜 육체적인 작업부하

를 결정하는 데 사용하였다. 많은 연구의 결과(Bielski *et al.*, 1976; Osborne, 1976; Zimmer, 1984; Gomer *et al.*, 1987; Wilson and Corlett, 1990; Luczak and Ge, 1989; Chen *et al.*, 1994)가 위의 방법이 육체적인 작업부하의 위험요소들을 표현하는 데 가장 좋은 방법임을 증명하고 있다. 육체적인 작업의 수요는 기본적으로 작업물을 들어올리고, 내리고, 이동시키고, 밀고, 당기는 것과 같은 수작업들을 포함한다. 그래서 수작업 때문에 작업부하의 요인이 정의되며 작업부하에 영향을 주는 위험요소들은 5가지 언어학상의 변수값을 갖는다. 그럼으로써 육체적인 작업부하에 영향을 주는 위험요소의 값이 결정된다. 이러한 변수의 언어학상의 값의 종류는 다음과 같이 정의된다.

1)  $A_1$  : 작업물의 무게

⇒ ‘매우 가볍다’, ‘가볍다’, ‘보통’, ‘무겁다’, ‘매우 무겁다’

2)  $A_2$  : 작업물을 들어올리고 내리는 횟수

⇒ ‘매우 적다’, ‘적다’, ‘보통’, ‘많다’, ‘매우 많다’

3)  $A_3$  : 육체적인 활동의 지속 정도

⇒ ‘매우 짧다’, ‘짧다’, ‘보통’, ‘길다’, ‘매우 길다’

4)  $A_4$  : 작업을 할 때 움직이는 거리

⇒ ‘매우 가깝다’, ‘가깝다’, ‘보통’, ‘멀다’, ‘매우 멀다’

위와 같은 방법을 사용하여 작업장의 환경으로 인해 발생하는 육체적인 작업부하( $B_1$ : 부적절한 온도,  $B_2$ : 부적절한 빛,  $B_3$ : 부적절한 소음,  $B_4$ : 부적절한 진동,  $B_5$ : 화학물질로부터의 노출)와 작업태도와 자세로 인해 발생하는 육체적인 작업부하( $C_1$ : 서있는 자세,  $C_2$ : 몸을 구부린 자세,  $C_3$ : 몸을 엎드린 자세,  $C_4$ : 몸을 비트는 자세)의 값을 각 조립생산 공장의 작업 및 작업 환경에 맞게 정할 수 있다.

본 연구에서 고려하는 육체적인 작업부하는 각 작업의 전체 작업부하를 구하기 위해서 각 작업부하의 위험요소에 가중치를 주게 된다. 이것은 조립생산 공장이 작업자의 작업부하에 더 큰 영향을 미칠 것이라고 생각되는 작업부하에 가중치를 크게 줌으로써 조립생산 공장의 독특한 특징을 나타낼 수 있기 때문이다. 예를 들어 화학약품을 많이 사용하는 조립생산 공장에서는 환경적인 요인에 의한 육체적인 작업부하가 다른 육체적인 작업부하에 비해 많은 영향을 미칠 것이며, 자동차 조립생산 공장의 경우는 몸의 자세와 태도로 인한 육체적인 작업부하가 다른 육체적인 작업부하에 비해 많은 영향을 미칠 것이다. 이러한 조립생산 공장의 특징을 육체적인 작업부하를 계산하는 데 고려함으로써 공장의 특성을 표현할 수 있다.

#### 4. 수리모형

본 연구에서는 서로 다른 단위를 갖는 두 가지 목적을 고려하여 라인밸런싱을 수행하고자 한다. 작업시간을 고려한 작업량

과 육체적인 작업의 수요와 작업태도, 환경적인 요인에 의한 육체적인 작업부하는 서로 다른 단위를 갖고 있어서 하나의 목적으로는 계산할 수가 없다. 그래서 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 방법으로 처음에는 가중치를 활용하여 수리모형을 수립하였다. 가중치를 활용함으로써 서로 다른 단위에 대한 값을 보정할 수 있기 때문이다. 하지만 가중치를 정확하게 결정하는 것이 매우 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 서로 다른 두 목적을 고려하기 위한 새로운 해결책으로 Chebyshev Goal Program(Chebyshev 목표계획법)을 사용하였다. Chebyshev 목표계획법을 사용하여 새로운 수리모형을 수립하게 되었다. Chebyshev 목표계획법에 대해서는 다음 장에서 설명할 것이다. 수리모형을 수립하는 데 사용한 기호는 다음과 같다.

Variable

$X_{rj}$  : 작업장  $i$  에 모델  $r$  의 작업  $j$  가 할당되면 1, 아니면 0

Parameter

$n$  : 작업장의 수

$N$  : 작업의 수

$R$  : 모델의 수

$L$  : 육체적인 작업부하 요인의 수

$P_j$  : 작업  $j$  의 선행 작업집합

$I_{rj}$  : 모델  $r$  이 작업  $j$  를 수행한다면 1, 아니면 0

$t_{rj}$  : 모델  $r$  의 작업  $j$  의 작업시간

$\lambda_l$  : 육체적인 작업부하의 요인에 줄 수 있는 가중치

$A_{jk}$  : 작업  $j$  의 육체적인 작업수요로 인해 육체적인 작업부하에 영향을 미치는  $k$  번째 위험요소의 값

$B_{jk}$  : 작업  $j$  의 작업장의 환경으로 인해 육체적인 작업부하에 영향을 미치는  $k$  번째 위험요소의 값

$C_{jk}$  : 작업  $j$  의 작업태도와 자세로 인해 육체적인 작업부하에 영향을 미치는  $k$  번째 위험요소의 값

$a_{jk}$  :  $A_{jk}$  의 가중치 ( $0 \leq a_{jk} \leq 1, \sum_{k=1}^4 a_{jk} = 1$ )

$b_{jk}$  :  $B_{jk}$  의 가중치 ( $0 \leq b_{jk} \leq 1, \sum_{k=1}^5 b_{jk} = 1$ )

$c_{jk}$  :  $C_{jk}$  의 가중치 ( $0 \leq c_{jk} \leq 1, \sum_{k=1}^4 c_{jk} = 1$ )

$w_j$  : 작업  $j$  의 작업시간으로 계산된 작업량

$$\left( = \sum_{r=1}^R t_{rj} / \sum_{r=1}^R I_{rj} \right)$$

$u_j$  : 작업  $j$  의 육체적인 작업수요로 인해 발생하는 육체적인 작업부하 ( $= \sum_{k=1}^4 a_{jk} A_{jk}$ )

$v_j$  : 작업  $j$  의 환경적인 요인으로 인해 발생하는 육체적인 작업부하 ( $= \sum_{k=1}^5 b_{jk} B_{jk}$ )

- $y_j$  : 작업  $j$ 의 몸의 자세와 태도로 인해 발생하는 육체적인 작업부하 ( $= \sum_{k=1}^4 c_{jk} C_{jk}$ )
- $\mu$  : 각 작업장의 작업시간으로 인한 평균 작업량 ( $= \sum_{j=1}^N w_j/n$ )
- $\rho_1$  : 육체적인 작업수요로 인해 발생하는 육체적인 작업부하의 표준 작업부하
- $\rho_2$  : 환경적인 요인으로 인해 발생하는 육체적인 작업부하의 표준 작업부하
- $\rho_3$  : 몸의 자세와 태도로 인해 발생하는 육체적인 작업부하의 표준 작업부하
- $C$  : 사이클타임

위와 같은 변수와 파라미터를 사용하여 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 혼합모델 라인밸런싱 수리모형을 수립할 수 있다.

LBPTPW

(Line Balancing with Processing Time and Physical Workloads)

$$\min \quad \alpha f_1(X_{irj}) + \beta f_2(X_{irj})$$

subject to

$$\sum_{i=1}^N X_{irj} = 1 \quad \forall r, j, \tag{1}$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N w_j I_{rj} X_{irj} < C \quad \forall i, \tag{2}$$

$$X_{irj} \leq \sum_{v=1}^i X_{vrq} \quad \forall i, r, j \text{ and } \forall q \in P_j, \tag{3}$$

$$\sum_{i=1}^3 \lambda_i = 1 \tag{4}$$

$$X_{irj} \in \{0, 1\} \quad \forall i, r \text{ and } j, \tag{5}$$

where

$$f_1(X_{irj}) = \sum_{i=1}^n \left| \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N w_j I_{rj} X_{irj} - \mu \right| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^R \sum_{j=1}^N |I_{rj} t_{rj} X_{irj} - I_{qj} t_{qj} X_{iqj}| \tag{6}$$

$$f_2(X_{irj}) = \lambda_1 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (u_j I_{rj} X_{irj} - \rho_1) + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (v_j I_{rj} X_{irj} - \rho_2) + \lambda_3 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (y_j I_{rj} X_{irj} - \rho_3) \tag{7}$$

본 연구에서 제시한 수리모형은 서로 다른 단위를 갖는 두 개의 목적을 동시에 만족시키기 위한 모형이다. 하지만 위 수

리모형은 가중치를 결정해야 하는 매우 중요한 문제가 존재한다. 따라서 이러한 문제를 발생시키지 않고 서로 다른 단위를 갖는 목적을 풀 수 있는 방법인 Chebyshev 목표계획법을 사용하여 새롭게 수리모형을 수립하였다. 본 연구에서 문제를 풀기 위한 방법으로 제시된 Chebyshev 목표계획법은 세 가지 새로운 수리모형을 수립해야만 한다. 먼저 작업시간을 고려한 수리모형은 다음과 같다.

LBPT (Line Balancing with Processing Time)

$$\min \quad f_1(X_{irj})$$

subject to (1), (2), (3), (5)

위 수리모형은 Goal Program의 첫 번째 단계이다. 이 수리모형은 작업시간을 고려하여 작업량을 평활화하고 각각의 모델에 있어 작업장 간 작업량을 평활화하기 위한 모델이다. 목적식의 첫 번째 term은 전통적인 라인밸런싱 목적으로서 작업시간을 고려한 작업량을 이용하여 전체 작업장들의 작업량 평활화를 이루고자 하는 목적이다. 이는 각 작업장의 평균 작업량과 실제 작업장의 작업량 차이를 최소화함으로써 얻을 수 있다. 두 번째 term은 각 모델에 대한 작업량 평활화를 위한 목적이다. 각 작업장에서 모델과 모델별 평균 작업시간의 차이를 최소화함으로써 각 모델의 평활화를 이룰 수 있다. 전체 모델에 의해 작업장 전체가 평활화되어 있다고 하더라도 각 모델이 평활화 되었다고는 할 수 없다. 각 모델의 평활화를 위한 목적을 고려한 것은, 이것이 모델 투입순서를 결정하는 문제에 영향을 미치고 또한 작업량을 각 작업장별로 골고루 분배할 수 있기 때문이다. 이를 위해 각 작업장에 할당된 모델과 모델별 평균 작업시간의 차이를 최소화하는 식을 목적에 추가하였다. 이렇게 함으로써 수요의 변동으로 인해 제품의 조합이 바뀌더라도 작업장에 할당된 작업량이 안정적으로 분배되어 있기 때문에 안정적인 라인을 구축할 수 있다. 이것은 Matanachai and Yano(2001)가 연구했던 모형에서 한 가지 목적식을 제외한 것과 유사하다. Matanachai and Yano(2001)의 모형의 목적식은 다음과 같다.

$$\min \Omega \sum_{i=1}^n \left| \sum_{j=1}^N w_j X_{ij} - \rho \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_{\gamma j} X_{ij} - \rho \right| + \sum_{i=1}^n \sum_{\gamma=1}^{\Gamma} \left| \sum_{j=1}^N I_{\gamma j} t_{\gamma j} X_{ij} - \bar{t}_{\gamma} \right|$$

위 수리모형에서 사용된 결정변수는  $X_{ij}$ 이며, 파라미터로 사용된  $t_j$ 는 작업시간,  $t_r$ 는 작업장에 할당된 모델의 평균작업시간,  $\Omega$ 는 가중치를 나타낸다. Matanachai and Yano(2001)는 라인밸런싱을 위하여 목적식에 세 개의 term을 두었다. 세 개의 term 중에서 첫 번째 term은 본 연구의 모델과 같이 작업량을 평활화하기 위한 것이고, 다른 두 개는 각 모델에 대해 작업량을 평활화하여 모델의 투입순서가 변화하더라도 좀더 쉽게 모델의 투입순서를 정하게 하고, 어떤 모델의 혼합에 있어서도

낮은 수준의 작업량을 갖도록 하기 위하여 사용되었다. 하지만 각 모델에 대해 작업량을 평활화하기 위해 사용한 두 개의 term은 같은 의미를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 같은 의미를 갖는 term 중에서 모델별 작업장 간 작업량의 평활화를 좀 더 잘 나타내주는 하나의 term만을 사용하기로 했다.

그리고 각 모델에 대해 작업량을 평활화시키기 위해서 각 모델의 작업장 평균 작업시간을 비교대상으로 사용하는 대신 작업장에 할당된 모델들 간의 작업시간을 비교하였다. 그 이유는 작업장에 할당된 각 모델의 작업시간을 평균 작업시간과 비교하는 것보다 직접적으로 각 모델 간의 작업시간을 비교하게 된다면 보다 정확한 값을 얻을 수 있기 때문이다. 또한 각 모델에 대해 작업량을 평활화하는 것이 보다 더 잘 이루어진다. 이와 같은 사실을 Matanachai and Yano의 논문에서 사용한 예제를 통하여 알아보자.

<예제>  $N = 6, n = 3, \rho = 0.7, R = 4$

$t_1 = 1, t_2 = 0.67, t_3 = 0.75, t_4 = 0.5, t_5 = 0.7, t_6 = 0.7$

- 모델 1은 작업 1, 3, 5로 구성되어 있다.
- 모델 2는 작업 1, 3, 6로 구성되어 있다.
- 모델 3은 작업 2, 4, 5로 구성되어 있다.
- 모델 4는 작업 2, 4, 6로 구성되어 있다.

위의 예제에 있어 선행공정도는 없다고 가정한다. 그리고 각 작업장에 할당된 모델들의 작업시간의 합을 나타내는  $t_{ir}$ 이라는 새로운 변수를 정의한다. 다음과 같은 두 가지의 작업할당 방법을 고려하여 비교해 보자.

<그림 2>의 작업할당을 비교해 보면 작업할당 II가 작업할당 I보다 어떤 모델 투입순서에도 작업량이 초과되지 않음을 알 수 있다(Matnachai and Yano, 2001). 또한 작업할당 II가 작업할당 I보다 작업을 보다 원활하게 수행하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 두 가지의 작업할당방법에 대해  $t_{ir}$ 의 값을 계산하여 그 의미를 알아보자.

<표 1>에서 보는 것과 같이 작업장에 할당된 각 모델의 작업시간의 합은 작업할당 I보다 작업할당II가 골고루 분포되어 있음을 알 수 있다. 또한 각 모델 간  $t_{ir}$  값의 차이가 작은 작업할당 II가 작업할당 I보다 작업을 보다 원활하게 수행하고

있음을 알 수 있다. 따라서 작업장에 할당된 각 모델의 작업시간의 합을 평활하게 분배하기 위해 목적식에 두 번째 term을 사용하여 작업장에 할당된 각 모델 간 작업시간의 합의 차이를 최소화하고자 했다.

표 1. 작업장에 할당된 각 모델의 작업시간의 합

	작업할당 I			작업할당 II		
	작업장 1	작업장 2	작업장 3	작업장 1	작업장 2	작업장 3
모델 1	$t_{11}=1.75$	$t_{21}=0$	$t_{31}=0.7$	$t_{11}=1$	$t_{21}=0.7$	$t_{31}=0.7$
모델 2	$t_{12}=1.75$	$t_{22}=0$	$t_{32}=0.7$	$t_{12}=1$	$t_{22}=0.7$	$t_{32}=0.7$
모델 3	$t_{13}=0$	$t_{23}=1.17$	$t_{33}=0.7$	$t_{13}=0.67$	$t_{23}=0.5$	$t_{33}=0.7$
모델 4	$t_{14}=0$	$t_{24}=1.17$	$t_{34}=0.7$	$t_{14}=0.67$	$t_{24}=0.5$	$t_{34}=0.7$

제약식 (1)은 각 작업은 하나의 작업장에서만 이루어져야 한다는 것을 나타낸다. 제약식 (2)는 작업장에 할당된 작업으로 발생하는 작업량이 작업장의 용량보다 작아야 함을 나타낸다. 만약 작업장의 용량보다 크게 되면 라인은 멈추게 되고 라인의 효율성은 떨어지게 된다. 제약식 (3)은 결합선행공정도를 바탕으로 한 작업의 선행관계를 나타낸다. 제약식 (5)는 결정변수에 대한 설명이다. 다음은 육체적인 작업부하를 고려한 수리모형이다.

LBPW (Line Balancing with Physical Workloads)

$$\begin{aligned} \min \quad & f_2(X_{irj}) \\ \text{subject to} \quad & (1), (2), (4), (5) \end{aligned}$$

위 수리모형은 Goal program의 두 번째 단계이다. 이 수리모형의 가장 큰 특징은 실제 조립생산 공장에서 가장 많이 발생하는 육체적인 작업부하를 고려하여 만들었다는 것이다. 만약 본 연구에서 고려하지 못한 다른 육체적인 작업부하가 꼭 필요하여 첨가하고 싶다면 공장의 환경에 맞게 모델을 확장할 수도 있을 것이다. 본 연구에서 제안한 세 가지 육체적인 작업부하 이외의 다른 작업부하를 모델의 목적식에 첨가하기만 하면 될 것이다. 또한 각 육체적인 작업부하 요인의 위험요소 값을 다양한 조립생산 공장의 환경에 맞추어서 정해준다면 다양한 조립생산 공장의 특성을 반영한 라인밸런싱 문제를 다룰 수 있을

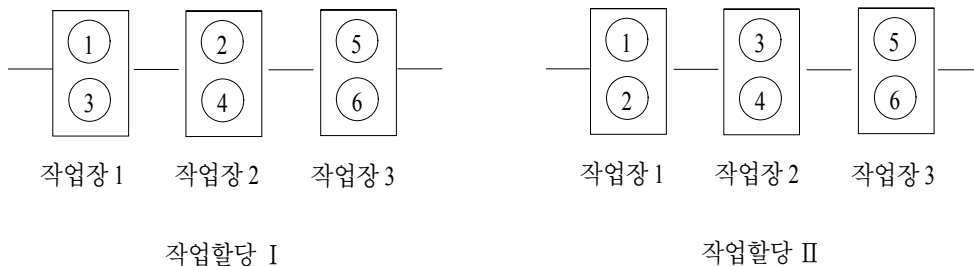


그림 2. 작업할당.

것이다. 본 연구에서는 LBPT와 같이 기존 연구의 라인밸런싱 목적인 작업시간을 이용한 작업량 평활화와 LBPW의 작업 및 작업장에 의해 나타나는 육체적인 작업부하를 고려하여 작업 부하 평활화를 동시에 달성하고자 모델을 만들었다. 작업시간만을 고려하게 된다면 다른 요인에 의해 발생하는 육체적인 작업부하를 무시하게 되어 작업장에서 작업하게 되는 작업자에게 근골격계 질환을 발생시킬 수 있다. 예를 들어, 작업장에 할당된 작업들의 작업시간이 짧은 데 비해 작업물의 무게가 무겁고, 작업장의 환경소음이 크고 화학약품에의 노출이 심하며, 몸을 심하게 비틀어서 작업을 해야 한다고 가정해 보자. 작업시간만을 고려하여 작업량의 평활화만을 하게 된다면 작업자에게 영향을 미칠 수 있는 육체적인 작업부하를 무시하게 되어 작업자는 쉽게 직업성 상해에 노출되게 된다. 따라서 작업장에 작업을 할당할 때 작업시간이 짧은 데 비해 육체적인 작업부하가 큰 작업이 있다면 작업시간이 길어도 육체적인 작업부하가 작은 작업을 함께 할당함으로써 작업자에게 일어날 수 있는 직업성 상해의 위험을 줄이고자 하였다.

LBPT의 결과로서 전체 작업장의 작업시간으로 인한 작업량 평활화를 얻을 수는 있다. 하지만 위의 예처럼 육체적인 작업 부하로 인해 작업자에게 직업성 상해를 일으킬 수 있으므로 LBPW를 고려해야만 한다. LBPW의 목적식은 하나의 작업장에서 실제 조립생산 공장의 육체적인 작업의 수요, 작업환경 및 작업자의 태도로 인한 작업장의 육체적인 작업부하와 각 육체적인 작업부하의 표준부하를 비교하여 그 차이를 최소화하고자 했다. 본 연구에서 사용된 표준부하는 일반적인 작업자가 작업을 수행하기에 가장 좋은 조건에서 작업을 수행하면서 측정된 육체적인 작업부하이다. 즉, 표준부하는 작업자가 가장 좋은 조건에서 작업을 수행하고 있고 직업성 상해에 걸릴 위험에서 벗어날 수 있는 기준이 되는 척도이며 높은 생산성과 고품질의 제품을 생산할 수 있는 기본부하라 할 수 있다. 표준부하를 사용하는 이유는 작업자가 높은 효율을 보여주는 표준부하에 가까운 육체적인 작업부하 내에서 작업을 수행하도록 하기 위함이다. 표준부하보다 높은 육체적인 작업부하로 작업을 수행하는 작업자는 직업성 상해에 걸릴 위험이 높을 것이며, 표준부하보다 낮은 육체적인 작업부하로 작업을 수행하는 작업자는 직업성 상해에 걸릴 위험은 낮지만 생산성을 떨어뜨리며 라인의 효율도 떨어뜨린다. 따라서 육체적인 작업부하의 평활화를 이루기 위한 기준으로 표준부하를 사용하였다. 작업시간만을 고려하여 작업량의 균형을 맞추는 것은 실제 작업자가 작업장의 환경과 작업태도, 육체적인 작업의 수요로 인해 겪게 되는 육체적인 작업부하를 무시하게 된다. 하나의 작업장에서 수행하게 되는 여러 작업으로 인해 작업시간을 고려한 작업량이 작다 하더라도 작업장의 환경과 작업태도, 육체적인 작업의 수요로 인한 육체적인 작업부하는 클 수가 있다. 따라서 이 두 가지가 서로 상충되지 않도록 또 다른 모델을 만들게 된 것이다. 이를 고려함으로써 실제 작업을 많이 하지 않는데도 발생할 수 있는 작업자의 질환발생 가능성을 줄일 수 있을 것이다.

또한 작업자의 효율성과 능력을 높여 작업자의 생산성은 물론 전체 공장의 생산성도 높일 수 있을 것이다.

제약식 (4)는 전체 작업부하에 영향을 미치는 공장의 특성을 반영하기 위한 가중치의 합이 1임을 나타낸다. 이것은 육체적인 작업부하에 영향을 미치는 세 가지 요인과 가중치에 의해 각 작업의 육체적인 작업부하가 결정됨을 보여준다. 조립생산 공장의 작업 및 작업환경의 특징에 따라서 가중치의 값이 달라질 수 있다. 나머지 제약식은 LBPT의 제약식과 의미가 동일하다. 지금까지 작업시간만을 고려한 수리모형과 육체적인 작업 부하만을 고려한 수리모형을 수립하였다. 그렇다면 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 수리모형인 LBPTPW는 다음과 같이 표현될 수 있다.

LBPTPW

(Line Balancing with Processing Time and Physical Workloads)

$$\min \quad \delta$$

subject to (1), (2), (3), (4), (5)

$$\sum_{i=1}^n \left| \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N w_j I_{rj} X_{irj} - \mu \right| + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^R \sum_{j=1}^N |I_{rj} t_{rj} X_{irj} - I_{qj} t_{qj} X_{iqj}| - \delta \leq z_1 \tag{8}$$

$$\lambda_1 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (u_j I_{rj} X_{irj} - \rho_1) + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (v_j I_{rj} X_{irj} - \rho_2) + \lambda_3 \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^R \sum_{j=1}^N (y_j I_{rj} X_{irj} - \rho_3) - \delta \leq z_2 \tag{9}$$

$$\delta \text{ nonnegative} \tag{10}$$

위 수리모형은 Goal Program의 최종단계이다. 단위가 다른 두 개의 목적을 두 개의 목표로 설정하여 각 목표값과의 차이가 가장 작은 편차값을 구하고자 하는 단계이다. 제약식 (8)과 (9)는 LBPT와 LBPW의 목적식과 LBPT와 LBPW를 각각 최적으로 풀었을 때 나온 최적의 값  $z_1, z_2$ 를 이용하여 만든 제약식이다. 이것은 단위가 다른 두 개의 목적을 두 개의 목표수준으로 바꾸어 두 개의 목표수준에 가장 가까운 해가 나오도록  $\delta$  값을 구하기 위한 제약식이다.

5. Chebyshev 목표계획법

본 연구에서는 라인밸런싱 문제를 풀기 위하여 목표계획법 방법 중 Chebyshev Goal Program 방법을 사용하였다. 일반적인 목표계획법이 목적을 달성하는 수준을 설정하기 위해 가중치를 두거나 주관적인 판단에 근거하여 설정하지만 Chebyshev Goal



Program의 경우는 이보다 좀더 객관적인 방법으로 수준을 설정한다. Chebyshev 목표계획법은 한 번에 하나씩 각 목적식에 대해 선형계획법 문제를 푼다. 그리고 각 목적식을 풀어서 나온 해를 다른 목적식에 대입하여 그 값을 얻어낸다. 이런 방법으로 모든 목적식에 대해 풀게 되면 각 목적식의 값 중에서 가장 좋은 값을 발견할 수 있다.

Chebyshev 목표계획법은 이 값을 열망수준으로 설정하여 최종 단계의 Chebyshev 목표계획법을 모델링하게 된다. 이 부분은 Chebyshev 목표계획법의 마지막 단계인 LBPTPW의 제약식 (8), (9)에 나타나 있다. 이처럼 Chebyshev 목표계획법으로 모델링을 한 후에 두 개의 목적을 동시에 고려한 문제의 해는 열망수준과의 편차를 최소화시킬 수 있는 가장 작은  $\delta$  값을 처음으로써 찾을 수 있다.

본 논문에서 사용된 Chebyshev 목표계획법 과정은 다음과 같다.

- 단계 1 : 첫 번째 목적과 두 번째 목적을 사용하여 LBPT와 LBPW와 같은 수리모형을 수립한다.
- 단계 2 : LBPT에 대해 해를 구한다. 구한 해를 LBPW의 목적식에 대입하여 목적식 값을 구한다.
- 단계 3 : LBPW에 대해 해를 구한다. 구한 해를 LBPT의 목적식에 대입하여 목적식 값을 구한다.
- 단계 4 : 단계 2, 3에서 구한 목적식 값 중에서 Lower Bound에 해당하는  $z_1, z_2$  값을 결정한다.
- 단계 5 : 단계 4에서 구한 Lower Bound를 각 목적의 목표수준으로 설정한 후 LBPT와 LBPW의 목적식을 가지고 LBPTPW의 제약식을 만든다. 이 때, 생성된 제약식에는 편차변수인  $\delta$ 를 첨가한다.
- 단계 6 : LBPTPW를 풀어서 목표수준과의 차이가 최소인  $\delta$ 를 구한다.

위와 같은 단계를 활용하여 본 연구에서는 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 라인밸런싱을 수행하였다.

### 6. 실험 결과

위 모형을 통해 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 라인밸런싱을 수행하기 위해서 실험을 실시하였다. 실험에 사용된 데이터는 단일모델에 대한 선행공정도와 작업시간이 나와 있는 Scholl and Klein(2000b)의 Test data를 활용하였다. 이 Test data를 혼합모델에 적용하기 위하여 단일모델에 대한 선행공정도를 혼합모델의 결합선행공정도로 사용하였고 단일모델에 대한 작업시간은 모델별 작업시간을 구하기 위해 사용하였다. 모델별 작업의 포함 여부는 0과 1을 랜덤하게 발생시켜서 생성시켰으며, 작업시간의 경우 모델별로 존재하기 때문에 각 모델의 작업시간을 얻기 위하여 Scholl and Klein(2000b)의 작업시간 자료 중 가장 큰 값과 가장 작은 값을 기준으로 하여

랜덤하게 생성시켰다. 즉, 가장 큰 작업시간과 가장 작은 작업시간을  $t_{max}, t_{min}$  이라 하고  $[0, 1]$  사이의 수  $r_j$ 를 무작위로 생성하게 되면 작업시간  $t_{rj}$ 는 다음 식에 의해 생성시킬 수 있다.

$$t_{rj} = r_j(t_{max} - t_{min}) + t_{min}$$

작업장의 용량을 제약하는 사이클타임은 연속적으로 생산되는 두 모델의 시간 차이를 말하며, 이것은 작업장에 할당된 작업에 의해 나타나는 최대 작업장 시간과 동일하다. 육체적인 작업부하는 제2장에서 설명한 방법에 의해 발생시켰으며, 육체적인 작업부하에 영향을 미치는 세 가지 요인에 대한 가중치는 본 연구에서 동일하게 부여하였다. 특히 가중치는 실제 조립공장에서 라인밸런싱을 책임지는 관리자가 결정해야 될 문제로서 실제 조립공장의 특성이 육체적인 작업부하의 요인 중 어느 작업부하에 더 많은 영향을 주는지 판단하여 가중치를 조절해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 특정 조립공장을 가정하지 않았으므로 똑같은 가중치를 부여하였다.

실험은 SUN UltraSparc 10 Workstation에서 수행하였으며 문제를 풀기 위한 소프트웨어로는 CPLEX 6.5를 사용하였다. 실험문제의 유형과 크기는 <표 2>와 같으며 각 문제는 5가지의 서로 다른 데이터를 갖는 문제로 구성되어 있다. <표 2>에서 보면 문제 유형이 두 가지로 나누어져 있음을 알 수 있다. 이것은 기존 연구에서 혼합모델 문제를 풀기 위해 제시한 “여러 모델에 공통인 작업은 같은 작업장에서 수행한다.”라는 가정과 본 연구에서 제시한 “여러 모델에 공통인 작업도 다른 작업장에서 수행할 수 있다.”라는 가정을 비교해 보기 위한 것으로서 위 가정을 제외한 다른 문제의 환경은 동일하게 주었다. 그리고 본 연구에서는 각 문제별로 5번의 실험을 수행한 결과의 평균값을 제시함으로써 분석을 하였다.

표 2. 문제유형 및 문제크기

유형	문제	작업장 수	모델 수	작업 수	변수 수	제약식 수
유형 I*	I-1	5	2	10	91	192
	I-2	5	2	15	115	340
	I-3	5	3	15	141	382
	I-4	5	3	20	166	342
	I-5	5	4	20	241	478
유형 II**	II-1	5	2	10	141	317
	II-2	5	2	15	190	615
	II-3	5	3	15	291	932
	II-4	5	3	20	366	812
	II-5	5	4	20	507	1107

\*: 동일 작업을 같은 작업장에 할당하는 경우

\*\*: 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우

<표 3>은 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 경우(LBPTPW)의 편차값에 의해 나타나는 작업시간과 육체적

인 작업부하의 값이 작업시간만을 고려한 경우(LBPT), 또는 육체적 작업부하만을 고려한 경우(LBPW)의 해와 비교하여 어떠한 차이를 나타내는지 알아보기 위하여 작업시간과 육체적인 작업부하의 증감비율을 통하여 보여주고 있다. 작업시간과 육체적인 작업부하의 증감을 표현하기 위하여 본 연구에서는 Processing Time Variance(PTV)와 Physical Workloads Variance(PWV)를 활용하여 계산하였다. LBPTPW의 해인 편차값에 의해 나타나는 작업시간 편차값을 LBPTPW\_T, 육체적인 작업부하 편차값을 LBPTPW\_W라 하고 LBPT의 해를 LBPT\_T, LBPW의 해를 LBPT\_W라 하면 PTV와 PWV는 다음의 식에 의해 계산된다.

$$PTV (%) = [(LBPTPW\_T - LBPT\_T)/LBPT\_T] \times 100$$

$$PWV (%) = [(LBPTPW\_W - LBPW\_W)/LBPW\_W] \times 100$$

<표 3>에서의 PTV와 PWV는 각 문제별로 5가지 문제를 풀 결과의 평균값을 나타낸 것이다. <표 3>에서 동일 작업을 같은 작업장에 할당하는 경우의 PTV와 PWV를 보면 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하는 것은 작업시간만을 고려하여 라인밸런싱을 한 경우보다 PWV 값이 최대 26.414%까지 줄어들음을 알 수 있고, 육체적인 작업부하만을 고려하여 라인밸런싱을 한 경우보다 PTV 값이 최대 37.672%까지 줄어들음을 알 수 있다. 그리고 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우의 PTV와 PWV를 보면 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하는 것은 작업시간만을 고려하여 라인밸런싱을 한 경우보다 PWV 값이 최대 26.854%까지 줄어들음을 알 수 있고, 육체적인 작업부하만을 고려하여 라인밸런싱을 한 경우보다 PTV 값이 최대 65.752%까지 줄어들음을 알 수 있다. 따라서 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하게 되면 두 개의 목적을 동시에 만족시킬 수 있는 라인밸런싱을 할 수 있음을 알 수 있다. 또한 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하게 되면 LBPT에 비해 육체적인 작업부하 측면에서 더 잘 평활화되며, LBPW에 비해 작업시간 측면에서 더 잘 평활화됨을 알 수 있다.

동일 작업을 같은 작업장에 할당하는 경우와 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우의 PTV와 PWV를 비교해 보자. LBPT와 비교했을 때 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우의 PTV는 평균 0.038%가 증가하고, PWV는 평균 13.814%가 감소한다. 하지만 같은 작업장에 할당하는 경우의 PTV는 평균 0.299%가 증가하고, PWV는 평균 15.679%가 감소한다. 또한 LBPW와 비교했을 때를 보면 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우의 PTV는 평균 49.019%가 감소하고, PWV는 평균 5.346%가 증가한 반면, 같은 작업장에 할당하는 경우의 PTV는 평균 31.049% 감소하고, PWV는 평균 16.426%가 증가하는 것을 알 수 있다. 이것은 동일 작업을 같은 작업장에 할당하는 것보다 다른 작업장에도 할당할 수 있게 하는 것이 작업량 측면에서나 작업부하 측면에서도 훨씬 더 잘 평활화됨

을 보여주는 결과이다.

표 3. LBPTPW와 LBPT, LBPW 간의 목적식 값의 증감비율

문제	LBPT 비교		LBPW 비교	
	PTV (%)	PWV (%)	PTV (%)	PWV (%)
I -1	0.129	-12.503	-37.145	17.807
I -2	0.006	-7.688	-29.645	0.582
I -3	0.042	-14.146	-14.459	4.5
I -4	0.451	-26.414	-36.326	15.951
I -5	0.868	-17.642	-37.672	43.291
평균	0.299	-15.679	-31.049	16.426
II -1	0.163	-2.708	-61.53	25.064
II -2	0.007	-9.711	-30.924	0.623
II -3	0.019	-2.859	-36.814	1.042
II -4	0	-26.936	-50.075	0
II -5	0	-26.854	-65.752	0
평균	0.038	-13.814	-49.019	5.346

<표 3>의 PTV와 PWV는 작업시간과 육체적인 작업부하의 증감비율을 나타내고 있다. 이것은 라인밸런싱을 수행하는 의사결정권자에게 있어 매우 중요한 자료로 활용될 수 있다. 조립공장의 특성에 맞게 작업시간과 육체적인 작업부하 중 어느 쪽에 더 비중을 두고 라인밸런싱을 할 것인지를 의사결정권자가 판단할 수 있도록 증가와 감소의 비율을 제시해 주고 있기 때문이다. 따라서 라인밸런싱을 수행하는 의사결정권자는 작업시간과 육체적인 작업부하의 증감비율을 보고 가중치를 어느 정도의 수준으로 정하고 라인밸런싱을 수행할 것인지 결정할 수 있을 것이다.

### 7. 결론 및 추후 연구과제

본 연구에서는 기존의 연구에서 다루지 않았던 작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려한 라인밸런싱 모형을 제시하였다. 기존의 연구에서는 작업시간만을 고려하거나 아니면 육체적인 작업부하만을 고려하여 라인밸런싱을 수행하였다. 하지만 작업시간만을 고려하게 되면 작업자에게 발생하게 되는 육체적인 작업부하의 과부하를 간과하게 되고 육체적인 작업부하만을 고려하게 되면 작업자에게 발생하게 되는 작업량 과부하를 간과하게 된다. 따라서 본 연구에서는 두 가지를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하고자 했다. 또한 서로 다른 단위를 갖는 문제를 풀기 위한 해법으로서 Chebyshev 목표계획법을 활용하였다.

작업시간과 육체적인 작업부하를 동시에 고려하여 라인밸런싱을 하게 되면 각각을 따로 라인밸런싱을 하는 것에 비해 두 개의 목적을 동시에 만족시킬 수 있다. 그리고 본 연구에서 제시한 모형을 통해 라인밸런싱을 수행하는 의사결정권자의

의사를 반영하여 라인밸런싱을 수행할 수 있음을 알았다. 즉, 작업시간과 육체적 작업부하 중 어느 쪽에 더 비중을 둘 것인지를 결정하고 라인밸런싱을 수행할 수 있다. 또한 동일 작업을 다른 작업장에 할당할 수 있는 경우가 같은 작업장에 할당하는 경우보다 작업량 측면에서 보다 잘 평활화됨을 알 수 있었다.

본 연구에서는 작업장의 환경을 결정하는 많은 파라미터가 존재한다. 따라서 각 파라미터의 값을 정확하게 정하는 것이 라인밸런싱을 수행하는 데 무엇보다도 중요하다. 본 연구에서는 실제 자료를 활용하지 않고 무작위로 파라미터 값을 생성하였다. 하지만 실제 조립환경에서의 값을 사용하여 파라미터 값을 결정하고 라인밸런싱을 수행하게 된다면 매우 실질적인 라인밸런싱 결과를 얻을 수 있을 것이다. 또한 작업의 수가 20개 이상인 경우의 문제를 풀기 위한 효율적인 알고리즘을 개발하는 것도 좋은 연구가 될 것이다.

## 참고문헌

- Adams, N.(1988), Occupational stress and workplace stresses: identifying and ameliorating the stresses, *Ergonomics International*, 88, 514-516.
- Ayoub, M. M., Selan, J. L. and Liles, D. H.(1983), An ergonomics approach for the design of manual material handling tasks, *Human Factors*, 25, 57-516.
- Berger, I., Bourjolly, J. -M and Baporte, G.(1992), Branch-and-bound algorithms for the multi-product assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 58(2), 215-222.
- Bielski, J., Wolowicki, J., and Zeyland, A.(1976), The ergonomic evaluation of work stress in the furniture industry, *Applied Ergonomics*, 7(2), 89-91.
- Carnahan, B. J., Norman, B. A. and Redfern, M. S.(2001), Incorporation physical demand criteria into assembly line balancing, *IIE Transactions*, 33, 875-887.
- Chaffin, D.(1975), Ergonomics guide for the assessment of human static strength, *American Industrial Hygiene Association Journal*, 36, 505-510.
- Chen, J, -G., Jung, H. S., and Peacock, B. J.(1994), A fuzzy sets modelling approach for ergonomic workload stress analysis, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 13(3), 189-216.
- Erel, E. and Gokcen, H.(1999), Shortest-route formulation of mixed-model assembly line balancing problem, *European Journal of Operational Research*, 116, 194-204.
- Erelbacher, S., Jordan, W. C. and van der Veen, D. J.(1991), Assembly line balancing accounting for variable processing times, *Technical Report*, General Motors Research Laboratories, Warren, MI.
- Gomer, F. C., Silverstein, L. D., Berg, W. K., and Lassiter, D. L.(1987), Changes in electromyographic activity associated with occupational stress and poor performance in the workplaces, *Human Factors*, 29(2), 131-143.
- Gokcen, H. and Erel, E.(1997), A goal programming approach to mixed-model assembly line balancing problem, *International Journal of Production Economics*, 48, 177-185.
- Grandjean, E.(1985), Fitting the Task to the Man: *Ergonomic Approach*, Taylor and Francis, London.
- Hagberg, M., Silverstein, B., Wells R., Smith M. J., Hendrick, H. W., Carayon, P. and Peresse, M.(1995), Work Related Musculoskeletal Disorders (WRMSDs): A Reference Book for Prevention, Taylor and Francis, New York.
- Hancock, P. A.(1989b), The effect of performance failure and task demand on the perception of mental workload, *Applied Ergonomics*, 20(3), 197-205.
- Hsu, L. Y.(1992), Design of an assembly line with stochastic task times, Master of Science thesis, Sloan School of Management, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA.
- Jung, H. S. and Jung, Hyung-Shik(2001), Establishment of overall workload assessment technique for various tasks and workplaces, *International Journal of Industrial Ergonomics*, 28, 341-353.
- Kosiak, M., Aurelius, J., and Herfield, W.(1971), Backache in industry, *Journal of Occupational Medicine*, 8, 51-58.
- Luczak, H., Ge, S.(1989), Fuzzy modelling of relations between physical weight and perceived heaviness: the effect of size-weight illusion in industrial lifting tasks, *Ergonomics*, 32, 823-837
- NIOSH(1981), Work practices guide for manual lifting, Technical Report, US Department of Health and Human Services.
- Osborne, D.J.(1976), Examples of the use of rating scales in ergonomics research, *Applied Ergonomics*, 7(4), 201-204.
- Roberts, S. D. and Villa, C. D.(1970), On a multi-product assembly line balancing problem, *AIEE Transactions*, 2(4), 361-365.
- Rowe, M.L.(1971), Low back pain : updated position, *Journal of Occupational Medicine*, 13, 476-478.
- Sanders, M. S. and McCormick, E. J.(1992), Human factors in engineering and design : 7th Edition, McGraw-Hill Inc., New York.
- Scholl, A. and Klein, R.(2000b), The task times and precedence graph information for the test problems can be downloaded from: <http://www.tu-darmstadt.de/bwl3/forsch/projekte/alb/>.
- Matanachai, S. and Yano, C. A.(2001), Balancing mixed-model assembly lines to reduce work overload, *IIE Transactions*, 33, 29-42.
- Thomopoulos, N.T.(1967), Line balancing-sequencing for mixed-model assembly, *Management Science*, 14(2), B59-B75.
- Thomopoulos, N.T.(1970), Mixed model line balancing with smoothed station assignments, *Management Science*, 16(9), 593-603.
- Wilson, J. R., Corlett, E. N.. (Eds.)(1990), Evaluation of Human Work, Taylor and Francis, Bristol, PA.
- Zimmer, A. C.(1984), A model for the interpretation of verbal predictions, *International Journal of Man-Machine Studies*, 20, 121-134.



**문성민**

한양대학교 산업공학과 학사  
한양대학교 산업공학과 석사  
현재: (주)LG산전 품질경영팀  
관심분야: 최적화 이론 및 응용, 생산라인  
밸런싱, 신뢰성 등



**최경현**

서강대학교 수학과 학사  
서강대학교 수학과 석사  
Virginia Tech. IEOR 석사  
Virginia Tech. ISE 박사  
현재: 한양대학교 산업공학과 부교수  
관심분야: 최적화 이론 및 응용



**권근섭**

한양대학교 산업공학과 학사  
한양대학교 산업공학과 석사  
현재: LG Telecom 법인사업본부 법인기술팀  
근무  
관심분야: 데이터마이닝, 생산라인 밸런싱,  
통신네트워크 등