

# 멀티 작업 라인 근사를 통한 2 기계 교차 분업 라인 모델 분석

김진영, 박경준\*

대구경북과학기술원

{tndnjs101, kjp}@dgist.ac.kr

## Analysis of two machines alternative division of labor line as a multi-job line

Jin-Young Kim, Kyung-Joon Park\*

Daegu Gyeongbuk Institute of Science & Technology (DGIST)

### 요약

공장의 생산 효율을 증대하기 위해 병목 현상이 일어나는 구간을 특정하고 이를 개선해야 한다. 병목을 개선하는 방법 중 하나로 분업을 선택할 수 있으며, 본 논문에서는 효율적인 분배방식을 찾기 위해 2기계 교차 분업 라인을 정의하고 이를 multi-job 라인 분석 방법을 통해 분석하고, 가상의 생산라인을 대입한 결과를 바탕으로 가장 효율적인 작업 분배 방식을 제안한다.

### I. 서론

최근 인공지능과 통신기술을 급격한 발전은 전 세계적으로 산업계 전반에 큰 영향을 주고 있다. 그 중 제조업계에서는 스마트 팩토리 시스템을 구축함으로써 효율성과 신뢰성 등의 향상을 이루어 내려 하고 있다.

생산성 향상을 위해서 생산 라인의 정확한 분석은 필수적이며, 이를 통해 병목 구간을 정확하게 특정 짓는 것과 각 기계의 사이클 타임을 조절하거나 라인의 구조를 바꿈으로써 생산 효율의 향상을 이뤄 낼 수 있다. 그러나 실제 제조업계에서의 생산 라인은 복잡한 패턴과 다양한 상황에 맞춰 운영 되고 있으며 이를 정확하게 분석하는 것은 매우 어렵다.

이 논문에서는 실제 업체에서 운용되고 있는 한 가지 작업을 두 머신이 번갈아 가며 나눠 작업하는 분업 머신을 멀티 작업 라인 근사를 통해 분석하고, 생산 효율을 높일 수 있는 분업 방식을 제시한다[1].

### II. 본론

본 논문에서 다루는 생산 시스템은 그림 1과 같이 기계 2 대( $M_1, M_2$ )와 두 기계 사이 하나의 버퍼로 구성된다. 각각의 기계의 작동시간은 지수 함수 분포를 따른다고 가정한다. 버퍼는 첫 번째 기계와 두 번째 기계 사이의 버퍼는 컨베이어 벨트와 같은 첫 번째 기계에서 작업이 끝난 작업물이 대기할 수 있는 장치로 최대 용량은  $N$ 이다. 두 기계는 한 가지 작업의 작업량을 나눠 ( $w_1, w_2$ ) 처리하며, 각각의 기계는  $w_1$ 과  $w_2$ 를 번갈아가며 처리한다.

따라서 이 생산 시스템은  $M_1$ 이  $w_1$ 을 처리하고,  $M_2$ 은  $w_2$ 를 처리하는 job1과  $M_1$ 이  $w_2$ 를 처리하고  $M_2$ 가  $w_1$ 를 처리하는 job2, 두 가지 작업을 수행하는 multi-job 라인이라고 할 수 있으며, 이러한 multi-job 라인의 생산량은 다음 세 단계의 과정을 통해 근사하여 분석할 수 있다[1].

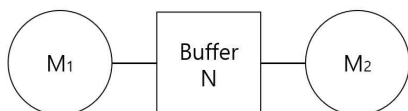


그림 1 2 기계 - 1 버퍼 생산라인

1) 수행되는 여러 job의 비율에 맞춰 각 기계당 하나의 작업 요구량을 가진 single-job 라인을 생성한다. 이 때 전체에서 특정 job이 차지하는 비율이  $r_j$ 이고 특정 job j에서 머신 i의 작업요구량을  $w_{ij}$ 라고 할 때 S개의 multi-job을 가상의 단순 작업 라인으로 변환시킨 각 머신 i의 작업요구량  $w_{i,v}$ 는 다음 식 (1)을 통해 구해진다[2].

$$w_{i,v} := \sum_{j=1}^S r_j w_{ij} \quad (1)$$

2) 가상의 single-job라인의 생산량을 계산한다. 이 과정에서 머신의 생산량 모델은 지수함수 모델이라 가정한다. i머신에 대해  $c_i$ 는 cycle time의 역수,  $\lambda_i$ 는 평균 작동 시간의 역수,  $\mu_i$ 는 평균 고장 시간의 역수,  $e_i$ 는 i번째 기계의 효율을 나타내는 상수으로써 식 (2)을 통해 구한다. 지수함수 모델의 2 기계 생산량은 다음 식 (3)을 통해 구해진다.

$$e_i = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i} \quad (2)$$

$$TP = \frac{G_4 + G_5 e^{K_1 N} + G_6 e^{K_2 N}}{G_1 + G_2 e^{K_1 N} + G_3 e^{K_2 N}} \quad (3)$$

$$G_1 = \mu_1 G_7^2 + \mu_1 G_7 [c_1 (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_2) - c_2 (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1)],$$

$$G_2 = \begin{cases} \mu_2 \lambda_1 c_2 [(c_1 - c_2)(\mu_1 - \mu_2) - (c_2 \lambda_1 + c_1 \lambda_2) - G_7], & \text{for } c_1 < c_2 \\ \mu_1 \lambda_2 c_1 [(c_1 - c_2)(\mu_1 - \mu_2) - (c_2 \lambda_1 + c_1 \lambda_2) + G_7], & \text{for } c_1 > c_2 \end{cases}$$

$$G_3 = \begin{cases} \frac{e_2 (c_2 - c_1 e_1) G_1 + c_1 e_1 (1 - e_2) G_2}{c_1 e_1 (e_2 - 1)}, & \text{for } c_1 < c_2 \\ \frac{e_1 (c_1 - c_2 e_2) G_1 + c_2 e_2 (1 - e_1) G_2}{c_2 e_2 (e_1 - 1)}, & \text{for } c_1 > c_2 \end{cases}$$

$$G_4 = \begin{cases} c_2 e_2 G_1, & \text{for } c_1 < c_2 \\ c_1 e_1 G_1, & \text{for } c_1 > c_2 \end{cases}$$

$$G_5 = \begin{cases} c_1 e_1 G_2, & \text{for } c_1 < c_2 \\ c_2 e_2 G_2, & \text{for } c_1 > c_2 \end{cases}$$

$$G_6 = \begin{cases} c_1 e_1 G_3, & \text{for } c_1 < c_2 \\ c_2 e_2 G_3, & \text{for } c_1 > c_2 \end{cases}$$

$$G_7 = \sqrt{[c_1 (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_2) - c_2 (\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1)]^2 + 4c_1 c_2 \lambda_1 \lambda_2}$$

$$\begin{aligned}
K_1 &= \frac{(E_1 + E_4)}{2} + \frac{\sqrt{(E_1 - E_4)^2 + 4E_2E_3}}{2}, \\
K_2 &= \frac{(E_1 + E_4)}{2} - \frac{\sqrt{(E_1 - E_4)^2 + 4E_2E_3}}{2}, \\
E_1 &= \frac{\lambda_2(c_1\mu_1 + c_2\mu_2) - \mu_2(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)}{c_1(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2)}, \\
E_4 &= \frac{\lambda_1(c_1\mu_1 + c_2\mu_2) - \mu_1(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2 + \lambda_1 + \lambda_2)}{c_2(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2)}, \\
E_2 &= \frac{-\lambda_2(c_1\mu_1 + c_2\mu_2)}{c_1(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2)}, \\
E_3 &= \frac{-\lambda_1(c_1\mu_1 + c_2\mu_2)}{c_2(c_2 - c_1)(\mu_1 + \mu_2)},
\end{aligned}$$

3) 가상의 single-job라인들과 job1, job2의 생산량을 통해 최종 multi-job의 생산량을 계산한다. 여기서  $r^*$ 는 job1과 job2의 생산량이 같아지는 특정 비율이며 식 (4)를 통해 구할 수 있다.  $\widehat{TP}(r, N)$ 은 버퍼가 N이고 두 job의 비율이 r일 때, 이를 가상의 단순 작업 라인으로 근사하였을 때의 생산량으로써 1)과 2)의 과정을 통해 구할 수 있으며 최종 multi-job의 생산량  $\widetilde{TP}_v(r, N)$ 은 식 (5)와 같다.

$$r^* = \frac{\frac{w_{22}}{e_2 W_2} - \frac{w_{12}}{e_1 W_1}}{\frac{w_{11} - w_{12}}{e_1 W_1} - \frac{w_{22} - w_{21}}{e_2 W_2}}. \quad (4)$$

$$\widetilde{TP}_v(r, N) = \min_{0 \leq r \leq 1} \left\{ \begin{array}{l} \frac{0.5r^*}{\frac{r}{\widehat{TP}(0.5r^*, N)} + \frac{0.5r^* - r}{\widehat{TP}_{j2}(N)}}, \\ \frac{0.5(1-r^*)}{\frac{r - 0.5(1+r^*)}{\widehat{TP}_{j1}(N)} + \frac{1-r}{\widehat{TP}(0.5(1+r^*), N)}} \end{array} \right\} \quad (5)$$

본 논문에서 다루는 생산 시스템은 하나의 job을 두 기계가 분업하여 이를 번갈아가며 처리하는 시스템이기 때문에 두 작업의 작업요구량 차이가 d일 때, job1과 job2에서 각각 첫 번째 머신과 두 번째 머신이 처리해야 하는 작업 요구량은 다음과 같은 식 (6)으로 표현 가능하다.  $w_{ij}$ 는 job j를 처리할 때의 i번째 머신의 작업요구량이다.

$$w_{11} = \frac{w+d}{2}, w_{12} = \frac{w-d}{2}, w_{21} = \frac{w-d}{2}, w_{22} = \frac{w+d}{2}. \quad (6)$$

위와 같은 단계를 거쳐 가상의 2기계 교차 분업 라인 모델의 생산량이 분배량의 차이에 따라 어떻게 변화하는지 그래프를 그려보았다. 가상의 모델에서 기계의  $T_{up}$ 은 9000초,  $T_{down}$ 은 1000초, 버퍼는 1인 것으로 가정하였고, 한 기계가 전체 작업을 처리할 경우 cycle time은 10초가 걸린다고 가정하였다. 교차로 분업 작업을 진행하기 때문에 생산량은 d가 0일 때를 기준으로 대칭적으로 나타남으로 d가 양수인 경우만 계산해 주었다. 결과는 그림 2와 같다.

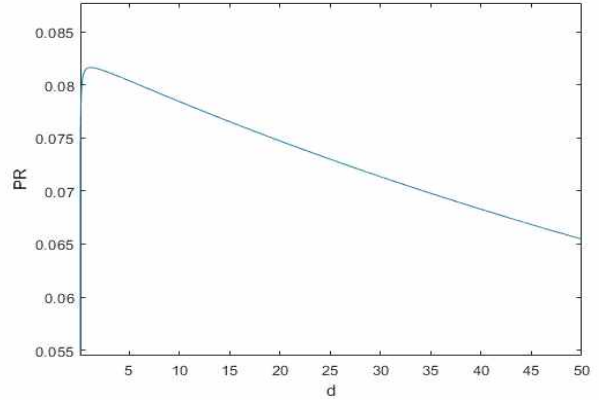


그림 2 d에 따른 가상의 생산 라인 생산량 계산 결과

생산량은 최고 약 0.08163/초, 최저 0.06546/초가 나왔으며 생산량 분배가 균등할 때가 최대의 생산량을 얻을 수 있고, 생산량이 한 쪽 기계에 치우칠수록 생산량이 줄어드는 것을 볼 수 있다. 이는 분배량을 조절해주는 것만으로 가상의 라인에서 최대 약 24.7%의 생산량 계산효과를 기대할 수 있다는 것을 의미한다. 다만 그래프 상에서 생산량이 최대일 때의 d값이 정확히 0이 아니며, d가 0에 가까워질수록 생산량이 급격히 감소하는 것을 관찰할 수 있는데 이는 본 논문에서 생산량을 구하는 방식이 어디까지나 근사식을 통한 것이며, d가 0이 될 때 분배량이 균등해져서 두 기계의 cycle time이 같아지는데 그 경우, 식 (3)의 E1과 E4의 분모가 0이되어 발산하기 때문이다. 전체적인 생산량 추이에 따르면 실제 생산 라인에서는 분배량이 완전히 같을 때 생산량이 가장 높을 것이라 기대할 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 분배한 작업을 교대로 시행하는 2 기계로 구성된 2 기계 교차 분업 라인의 성능을 multi-job라인의 생산량 분석 방법을 이용하여 계산하였다. 가상의 생산라인을 설정하고 이를 분석한 결과 분배량을 균등하게 하는 것이 가장 높은 생산량을 얻을 수 있는 분배 방식인 것을 알 수 있었고, 본 논문에서 계산한 가상의 라인에서는 최대 약 24.7%의 성능 향상을 기대할 수 있었다.

이후 진행할 연구는 수학적 증명과정을 통해 본 논문의 연구 결과를 입증하는 것과 3개 이상의 머신에서 다수의 작업을 분배하는 라인에 대해서 일반화를 하는 것이다.

### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the DGIST R&D Program of the Ministry of Science and ICT (20-EE-01).

### 참고 문헌

- [1] Alavian, P., P. Denno, and S. M. Meerkov. 2017. "Multi-job Production Systems: Definition, Problems, and Product-mix Performance Portrait of Serial Lines." *International Journal of Production Research* 55: 7276 - 7301
- [2] Jingshan Li, Semyon M. Meerkov. "Production systems engineering," Springer, 2009.