

페트리넷과 시뮬레이션을 통한 제조 시스템의 수행도 개선 방법론

이기창* · 박찬권** · 정한일*** · 박진우*

Performance improvement methodology for a manufacturing system using Petri net and simulation analysis

Abstract

심화되는 경쟁환경에서 우위를 점하기 위해서는 제조 시스템의 수행도를 관리하고 개선하는 활동이 필요하다. 본 연구는 페트리넷(Petri net)과 시뮬레이션을 사용하여 제조 시스템 수행도의 하나인 산출율을 향상시키는 방법론을 제안하였다. 시뮬레이션은 제조 시스템의 수행도 평가에 많이 사용되나, 시스템의 개선 방향에 대한 분석 능력이 취약하다. 한편, 페트리넷은 정확한 분석을 수행할 수 있으나, 대상 시스템이 복잡해짐에 따라 분석 능력이 현저히 감소된다. 본 연구에서는 페트리넷의 복잡도를 증가시키는 주요 원인 중 하나인 자원 공유를 분리된 페트리넷으로 표현함으로써 페트리넷의 분석 능력을 유지하고자 하였다. 또, 이를 바탕으로 자원 공유에 관련된 파라미터에 대한 회귀분석모형을 도출하였다. 이 회귀분석모형에 대한 최적화 과정에 의해 자원의 적절한 배치 혹은 제품비율에 대한 개선 방향을 얻어낼 수 있다. 이러한 페트리넷 기반 분석 방법과 시뮬레이션 방법을 동시에 사용함으로써 시뮬레이션 모형에서 산출율을 개선할 수 있으며, 실제 제조 시스템에 적용할 수 있을 것이다.

Keywords : Performance improvement, Petri net, regression model, simulation

1. 서론

다양해진 고객의 요구와 글로벌화된 경쟁환경에서 기업의 전략적 의사결정의 중요성은 매우 크다고 할 수 있다. 기업의 전략은 사업전략을 거쳐 판매전략, 제조전략 등으로 세분화되고 개별 오퍼레이션까지 연결된다. 기업이 경쟁력을 얻기 위해서는 다양한 수준의 전략과 운영이 동일한 방향성과 유기적 관련성을 가져야 한다 [3, 6].

제조시스템과 관련된 의사결정은 그 시간의 범위에 따라 전략, 전술 그리고 운영의 3가지 단

계로 나눈다[2]. 이 중, 전략적 수준의 의사결정 사항은 제조 시나리오간 비교, 생산용량과 마켓 간의 균형 유지, 부품에 대한 구매 및 제조 여부, 프로세스 종류, 재고 수준, 조직 구조 등이 있으며, 그 적용범위도 보통 1년 이상의 계획기간을 가진다[8]. 이와 같은 제조전략과 관련된 의사결정을 효과적으로 내리기 위해서는 제조 시스템의 수행도 지수가 신속히 분석될 필요가 있다. 즉, 제조 시스템의 수행도 지수에 대한 결과를 바탕으로 프로세스의 변경이나 제품 생산 비율의 변경 등 다양한 의사결정을 수행할 수 있게 된다.

Wiendahl은 shop floor control을 대상으로 하는 performance monitoring and control 메커니즘을 제안하였다. 관리자가 쉽게 알아볼 수 있

* 서울대학교 산업공학과

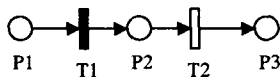
** 연산대학교 정보경영학부

*** 대전대학교 컴퓨터정보통신공학부

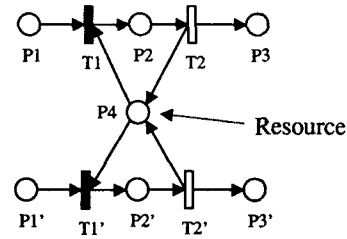
도록 바차트, 라인그래프, Funnel model 등의 리포트들을 사용하여 여러 가지 measure의 현재 상태를 파악할 수 있게 하고 있다. 또, 명시적으로 정의하지는 않았지만, 완제품수량, 납기 만족도 등의 물류관련 measure를 financial measure로 변환하여 각 output의 평가해야 한다고 말하고 있다[7]. Mize는 객체지향 시뮬레이션 프레임워크를 제안하였다. 그는 먼저 제조시스템에 대하여 객체지향 모델링을 수행한 후 이에 대하여 대기행렬 및 페트리넷으로 그 수행도를 분석하는 접근법을 설명했으나, 상세한 시스템 설계를 제시하지는 않았다[5]. Aguiar는 CIM-OSA behavior model을 페트리넷으로 변환한 후, 페트리넷을 통해 시스템에 대한 시뮬레이션을 수행할 수 있음을 보였다[1]. 이상의 연구들은 제조 시스템의 수행도 분석을 위해 페트리넷 또는 시뮬레이션을 활용하고 있다. 그러나, 개선을 위한 대안의 제시기능은 포함되어 있지 않다. 본 연구에서는 페트리넷 분석과 회귀분석을 결합하여 수행도 지수의 개선 방향을 구하고, 이를 시뮬레이션 모형에 반영하는 방법론을 제시하고 있다.

2. 페트리넷 모델

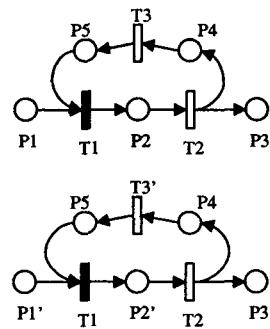
본 연구에서는 제조 프로세스내의 하나의 활동 또는 오퍼레이션을 표현하기 위한 페트리넷을 [그림 1a]와 같이 정의하였다. Place P1과 P3는 각각 이 활동의 시작준비상태와 완료상태를 의미한다. Transition T1과 T2는 각각 활동의 시작 event 및 종료 event를 의미한다. Place P2는 이 활동이 현재 처리중인 상태임을 나타낸다. [그림 1b]에서 P4는 활동을 수행하는데 필요한 자원을 나타낸다.



(a)



(b)



(c)

[그림 1] 페트리넷을 사용한 활동 표현

[그림 1b]에서 볼 때, 실제의 시스템을 묘사하면 활동이 늘어나고 동일 자원을 공유하는 활동도 같이 증가함에 따라 analytic 기법을 적용하기가 매우 어려워진다. 복잡한 페트리넷에 대한 수행도 분석을 위해 analytic 기법대신에 approximation이나 normalization technique과 같은 기법들이 사용된다. 그러나, approximation 기법은 marked graph에 대하여 적용할 수 있는데, [그림 1b]는 conflict가 발생하므로 marked graph에 속하지 않는다. 따라서, marked graph로 변환한 후에 marked graph에 대한 분석 방법을 적용할 수 있다. [그림 1c]에서는 두 활동이 각각 자원 대기시간을 모방하는 인공적인 transition인 T3, T3'를 가진다. 이러한 transition을 resource transition이라고 부르자. Resource transition에 대한 firing rate를 특정 룰에 의해 설정함으로써 분리된 activity가 동일 자원을 공유하는 것을 모방할 수 있다. 다음은 이 resource transition의 firing rate를 구하는 과정

을 보이고자 한다. 각 프로세스는 하나의 페트리넷으로 모델링되도록 하였다. 또, 프로세스별 산출 품목은 하나의 종류로 가정하도록 한다. 예를 들어, 하나의 제조 프로세스에서 n개의 품목이 산출된다고 할 때, 본 연구에서는 n개의 분리된 프로세스를 사용하게 된다.

각 페트리넷은 최종 제품별로 분리된 형태로 생성된다. 이 분리된 페트리넷은 공유자원을 통해 상호영향을 미치게 된다. 각 자원 모델의 firing rate는 이 자원이 다른 페트리넷의 처리 모델에 할당되는 이벤트의 발생율을 의미하며, 그 값은 각 처리 모델의 firing rate에 의해 결정된다. 본 연구는 다음과 같이 이를 반영하였다.

n개의 활동이 하나의 자원을 공유한다고 하고, 다음과 같이 notation을 정의하자.

각 활동의 가공율 : μ_1, \dots, μ_n

각 활동의 총 가공시간비 : $\alpha_1, \dots, \alpha_n$

각 활동의 자원점유횟수 : r_1, \dots, r_n

각 활동의 자원비점유 이벤트 발생율 : $\lambda_1, \dots, \lambda_n$

이와 같이 주어질 때, α_i, r_i, μ_i 의 관계는 다음 식과 같다.

$$a_k = \frac{r_k / \mu_k}{\sum_{i=1}^n r_i / \mu_i} \quad (1)$$

식 (1)로부터 처리모델 k의 자원점유회당 자원 비점유시간은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{1}{\lambda_k} &= \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^n r_i / \mu_i}{r_k} \\ &= \frac{\sum_{i=1}^n r_i / \mu_i \cdot \sum_{i=1, i \neq k}^n a_i}{\alpha_k \cdot \mu_k \cdot \sum_{i=1}^n r_i / \mu_i} \\ &= \frac{\sum_{i=1, i \neq k}^n a_i}{\alpha_k} \quad (2) \end{aligned}$$

따라서, 처리모델 k의 자원비점유 이벤트 발생을 λ_k 는 다음과 같이 추정할 수 있으며, 자원

모델 k의 firing rate로 적용된다.

$$\lambda_k = \frac{a_k}{\sum_{i=1, i \neq k}^n a_i} \cdot \mu_k \quad (3)$$

3. 회귀분석모형

위에서 살펴본 바와 같이 분리된 페트리넷은 marked graph가 된다. 복잡한 marked graph에 대한 분석은 휴리스틱을 통하여 수행할 수 있을 것이다. 여기서는, 대상 시스템이 비교적 단순하므로 안정상태분석을 바로 수행하도록 하였다.

주어진 페트리넷에서 수행도 지수는 산출율이며, 그 값은 α_i 에 따라 바뀌게 된다. 그러나, 안정상태분석에 의한 α_i 와 산출율의 관계는 매우 복잡한 비선형함수의 형태를 가진다. 따라서, 본 연구에서는 α_i 값과 산출율에 대한 데이터를 도출하여 이를 바탕으로 독립변수가 α_i 이고 종속변수가 산출율인 회귀분석모형을 수립하고자 하였다.

예를 들기 위하여, A, B, C, 3개의 제품을 가공하는 간단한 제조 시스템을 가정하자. 각 제품의 라우팅은 표 1~3과 같다.

[표 1] 제품 A의 라우팅

op#	operation	w/c	time(min)
1	rough milling	RM_WC	10
2	drilling	DR_WC	45

[표 2] 제품 B의 라우팅

op#	operation	w/c	time(min)
1	rough milling	RM_WC	10
2	fine milling	FM_WC	30

[표 3] 제품 C의 라우팅

op#	operation	w/c	time(min)
1	rough milling	RM_WC	15
2	fine milling	FM_WC	20
3	drilling	DR_WC	30

먼저, 모든 α_i 에 대하여 $0 < \alpha_i < 1$ 에 해당하는 값을 일정 간격으로 생성한다. 예를 들어, 제품 A의 경우, 아래 표 4와 같은 α_i 의 조합을 생성할 수 있다. 표 4의 최우측열은 산출율을 의미하며 이는 주어진 α_i 의 조합에 대한 페트리넷 분석을 통하여 얻어질 수 있다.

[표 4] 회귀분석 데이터

α_1	α_2	산출율
0.2	0.2	0.0045
0.2	0.4	0.0088
...
0.8	0.8	0.0163

페트리넷 분석을 통해 산출율을 구할 때는 시스템 상태 전이를 의미하는 reachability graph를 구하고 이를 바탕으로 관련된 시스템 상태에 대해서 상태전이행렬의 역행렬을 통해 산출율을 구하게 된다. alpha값의 변경에 따라 새로운 산출율을 구하는 경우는 reachability graph를 다시 생성할 필요가 없다. 따라서, 회귀분석을 위한 각 데이터는 역행렬을 구하는 연산으로 구해질 수 있다.

다음의 식은 위 표 4의 데이터를 바탕으로 생성한 이차다항 회귀분석모형이다.

제품 A :

$$0.0001 \alpha_1 + 0.0220 \alpha_2 - 0.0003 \alpha_1^2 - 0.0022 \alpha_2^2$$

($r^2 \approx 0.99$)

제품 B :

$$-0.0059 + 0.016 \alpha_3 + 0.0469 \alpha_4 - 0.0092 \alpha_3^2 - 0.0156 \alpha_4^2$$

($r^2 \approx 0.97$)

제품 C :

$$-0.0187 + 0.0233 \alpha_5 + 0.0338 \alpha_6 + 0.0444 \alpha_7 - 0.0184 \alpha_5^2 - 0.0293 \alpha_6^2 - 0.0238 \alpha_7^2$$

($r^2 \approx 0.81$)

단, $\alpha_1 + \alpha_3 + \alpha_5 = 1$, $\alpha_4 + \alpha_6 = 1$

$\alpha_2 + \alpha_7 = 1$

이 회귀모형에 대한 최대화문제의 최적해는 ILOG CPLEX 6.5를 사용하여 구할 수 있으며 그 값은 표 5와 같다.

이 α_i 를 사용하여 특정 자원이 각 제품에 할당되는 회수의 비율을 식 (1)를 통해 계산할 수 있으며 표 6과 같다.

[표 5] 회귀모형의 대한 최적해

α_i	value	α_i	value
α_1	0.0481	α_5	0.5323
α_2	0.4846	α_6	0.2572
α_3	0.4196	α_7	0.5154
α_4	0.7428		

[표 6] 자원별 품목에 할당되는 비율

	제품 A	제품 B	제품 C
rough milling	24%	38%	38%
fine milling		66%	34%
drilling	46%		54%

따라서, 최적의 투입율은 다음의 비선형계획 문제를 통해 구할 수 있다.

$$\text{Minimize } (y_1 - 0.24)^2 + (y_1 - 0.46)^2 + (y_2 - 0.38)^2 + (y_2 - 0.66)^2 + (y_3 - 0.38)^2 + (y_3 - 0.34)^2 + (y_3 - 0.54)^2$$

s.t. $y_1 + y_2 + y_3 = 1$

(y_1, y_2, y_3 는 각각 제품 A, B, C의 투입율)

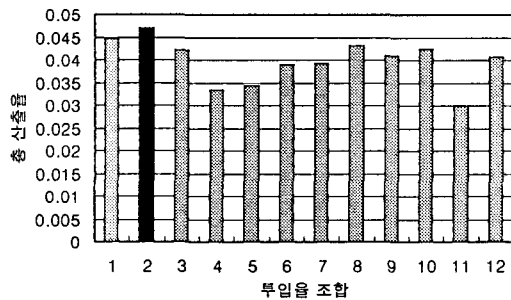
4. 시뮬레이션

위의 주어진 라우팅 자료에 의해 시뮬레이션을 수행하면 아래의 표 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. 이 때, 각 워크센터에서 사용된 우선순위규칙은 기본적으로 적용되는 FIFO 규칙이다. 각 품목에 대한 투입율은 0.33, 0.33, 0.33으로 동일하게 가정하였다. 표 7에서 수정된 투입율에 의한 산출율은 섹션 3의 수리적 모형에 의해 유도된 투입율을 적용한 경우이다. 최적의 투입율은 0.24, 0.41, 0.35이다. Arena 3.5의 CREATE 모듈로서 모수 5인 지수분포에 의해 엔터티를 발생시키고, CHANCE 모듈을 사용하여 위의 투입율에 따라 실제 투입이 이루어지도록 하였다. 이와 같은 실행기간 10000동안 시뮬레이션을 수행한 결과 표 7과 같은 결과를 얻었다.

[표 7] 시뮬레이션 결과

품목	산출율	
	초기 투입율 사용	수정된 투입율 사용
typeD	0.0136	0.0131
typeF	0.0196	0.0228
typeA	0.0155	0.0111
계	0.0421	0.0470

이 표에서 수정된 투입율이 초기 투입율에 비해 약 5%의 총 산출율 개선을 가져옴을 알 수 있다. 다른 투입율 조합과 비교하기 위해 10개의 투입율 조합을 임의로 발생하여 총 산출율을 비교하면 그림 2와 같다.



[그림 2] 여러 투입율 조합의 비교

이 그림에서 조합 1은 초기 투입율 조합을 의미하며, 조합 2는 최적 투입율 조합을 나타낸다. 조합 3~12는 임의로 생성된 투입율 조합을 나타낸다.

5. 결론

제조 시스템의 효과적 운용을 위해서는 수행도 지수에 대한 관리 및 개선 활동이 필수적이다. 일반적인 수행도 지수는 리드타임, 산출율, 품질, 비용, 납기신뢰성, 유연성 등으로 정의된다. 본 연구에서는 산출율을 대상으로 수행도를 개선하기 위하여 페트리넷과 회귀분석모형을 사용하는 방법론을 제안하였다. 먼저, 제조시스템을 페트리넷으로 모델링한 후, 이 페트리넷을 분리하여 복잡도를 낮춘 후, 산출율에 대한 회귀분석 모형을 도출하였다. 이 회귀분석 모형에 대한 최적화 과정을 통해 좀 더 나은 산출율을 위한 제품별 투입율을 도출할 수 있었다. 이러한 방법으로 얻어진 투입율을 실제 시뮬레이션 모델로 검증함으로써 본 접근법이 타당함을 보였다. 본 연구에서는 수행도 지수로 산출율만을 대상으로 하였으나, 본 접근법을 확장하여 리드타임, 비용, 품질 등을 포괄하는 것이 추후연구 과제이다.

참고문헌

- 1) Aguiar, M.W.C., Weston, R.H., CIM-OSA and stochastic time Petri nets for behavioral modeling and model handling in CIM systems design and building, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part B, Journal of Engineering Manufacture, 1993, Vol. 207, 147-208.
- 2) Harris, C.R., Modeling the impact of design, tactical, and operational factors on manufacturing system performance,

- International Journal of Production Research, 1997, Vol. 35, No. 2, 479-499.
- 3) Hill, T., Manufacturing strategy, 2000, McGraw-Hill.
- 4) Joseph, A.T., Formulation of manufacturing strategy, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 1999, 15, 522-535.
- 5) Mize, J.H., Bhuskute, H.C., Pratt D.B., Kamath M., Modeling of integrated manufacturing systems using an object-oriented approach, IIE Transactions, 1992, Vol. 24, No. 3, 14-26.
- 6) Ward, P.T., Duray, R., Manufacturing strategy in context: environment, competitive strategy and manufacturing strategy, Journal of Operations Management, 2000, 18, 123-138.
- 7) Wiendahl and Ullmann, Logistics performance measurement of shop floor activities, Annals of CIRP, 1993, Vol. 42, pp. 509-512.
- 8) Wu, B., Manufacturing systems design and analysis, 2nd ed., 1994, Chapman & Hall.