한국경영과학회/대한산업공학회 2003 춘계공동학술대회
2003년 5월 16일-17일 한동대학교(포항)

Petri net을 이용한 제조시스템의 워크플로우 모델링

김 태운*[1] · 서 윤호[2] · 신 동목[3]

Manufacturing workflow modeling using Petri net

T. Kim[1] · Y. Seo[2] · D. Sheen[3]

[1]경성대학교 산업공학과
*(051-620-4726, twkim@ks.ac.kr)
[2]울산대학교 산업정보경영공학부
[3]울산대학교 수송시스템공학부

Abstract

The Purpose of this paper is to automate the representation of manufacturing line using Petri net model. In the manufacturing cell, the line can be represented using workflow which is composed of Bill of Material (BOM) and Bill of Processes (BOP). BOP shows the precedence of processes and the relationship between assembly and disassembly. As a modeling scheme, generalized stochastic Petri net is adopted. For a problem domain with flexible manufacturing cell, Petri net model is made and behavioral properties are analyzed.

1. 서론

기업의 엔지니어링 관련 시스템이나 제조 시스템을 설계하고 모델링 하는 일은 매우 복잡한 일이다. 따라서 이들 시스템을 모델링 하는 일은 엔지니어링이나 제조시스템 컨트롤에 있어서 중요한 역할을 하게 된다. 프로세스 모델은 제조 시스템을 표현하고 그들을 통제가 가능한 작은 모듈로 분할하는데 크게 도움이 된다. 일반적으로 제조라인은 BOM과 그에 해당하는 프로세스인 BOP를 이용해서 나타낼 수 있다. BOP는 BOM과 제조 프로세스를 표현해 주고 있다. 이것은 조립 분해의 관계와 프로세스의 전후관계를 표현해 주고 있다.

제조시스템의 모델링을 위해서는 여러 가지 방법이 이용되어 왔다. 특히 최근에는 대부분의 기업들이 ERP시스템을 구비함에 따라서 제조시스템의 관리가 단독으로 행해지지 않고 ERP와 연계되어 고려되어 져야 한다. 따라서 ERP하에서의 FMS 컨트롤을 위해서 MES (Manufacturing Execution System)이 제안되었다 (Choi and Kim, 2002). 여기에서는 MES의 기능적 요구사항을 식별하기 위해서 FMS를 갖는 shop floor에서의 주문처리과정을 IDEF-0모델을 이용해서 모델링 하였다. 또한 샵 레벨에서의 생산현장에서 제조활동 및 각종 지원활동을 통제하기 위해서 Petri net을 이용해서 모델링을 하고 이를 소프트웨어로 개발하여 교육용으로 활용도 하고 있다 (이준수외 2002).

워크플로우는 (WfMC, 2003) 비즈니스 프로세스의 표현과 구현에 주로 사용되어 왔다. 특히 Aalst (1999)는 워크플로우를 비즈니스 프로세스의 관리측면에서 고찰하여 워크플로우의 기능과 역할을 위한 구조를 제시하였다. 유럽에서는 CIMOSA (CIM Open System Architecture) 프로젝트를 통해서 WfMC 표준을 기초하여 마이크로 시스템의 워크리스트를 설계하는데 워크플로우 시스템을 활용하였다 (Dickerhof et. al., 1999) (Ortis, et. al., 1999). 또한 워크플로우 프로세스는 Petri net의 형식으로 표시 가능한데, 주어진 BOM 정보로부터 이에 대응하는 Petri Net 정보를 자동으로 생성시키는 프로세스 디자이너의 프로토타입을 구현하고 이를 B2B환경에서 사용을 위한 방안이 제시되었다 (한용호, 김태운, 2002).

제조시스템에서 FMS나 셀의 모델링에는 Petri net이 많이 이용되어 왔다. 전통적인 단순한 형태에서 시간, color, 계층적으로 확장된 Petri net이 주로 많이 사용되어 지고 있다. Chiola et. al. (1993)에서는 generalized stochastic Petri net에서 우선순위와 inhibitor arcs를 가진 경우에 대하여 모델링하고, FMS cell에 이를 적용하고 있다. Balduzzi et. al. (2001)은 시간과 사건이 동시에 고려된 1차 복합 페트리 넷 (First-Order Hybrid Petri net: FOHPN)을 제안하고 이를 job shop환경에 적용하고 있다. Zimmermann et. al. (2001)에서는 colored stochastic Petri net에 기초한 TimeNET (Timed Net Evaluation Tool)을 제안하고 이를 이용하여 FMS cell의 모델링과 평가에 활용하고 있다. 이상의 검토에서도 드러났듯이 시간, color, 계층화 등으로 확장된 Petri net이 제조 시스템이나 FMS cell의 모델링, 평가 및 컨트롤에 많이 활용되고 있다.

본 연구의 목적은 제조 시스템에서 유연한 생산라인을 모델링 하기 위하여 복잡한 시스템을 컨트롤이 가능한 작은 모듈로 나누고 이들 각각의 모듈을 generalized stochastic Petri net (GSPN)을 이용하여 모델링을 하고 각각의 모델에 대하여 정성적인 요소에 해당하는 행태적인 특성을 이용해서 시스템을 분석하고자 하는 것이다.

2. GSPN 모델링

Petri net은 제조시스템의 설계, 모델링, 시뮬레이션과 컨트롤에 아주 유용한 것으로 알려져 있으며, 다음과 같은 특성을 가지고 있다 (Desochers and Al-Jaar, 1995).

- Petri net은 stochastic하고 동시적이며 비동기적인 사건의 전후관계와 구조적인 상호작용을 나타낼 수 있다.
- 그래픽한 표현은 복잡한 시스템과 메커니즘의 구성요소들이 어떻게 상호 연관되어 있는지를 가시화 할 수 있다.
- 충돌현상과 버퍼가 쉽고 효율적으로 모델링이 가능하다.
- 시스템의 deadlock이 쉽게 발견 가능하다.
- 잘 발전된 수학적인 모델로 계층적인 구조를 표현 가능하다.
- 복잡한 시스템을 체계적으로 분석할 수 있는 구조적인 프레임워크를 제공한다.
- FMS에서의 실시간 컨트롤 시스템을 구현할 수 있게 해 준다.

실제 제조시스템의 환경은 아주 복잡해서 이를 모듈로 분해해서 각각을 모델링하고 분석하는 것이 필요하다. 모듈적인 접근방법은 제조시스템을 작은 모듈로 나누어서 각각의 모듈을 Petri net을 이용해서 모델링하고 이들에 대한 정성적인 특성을 평가하고 다음은 정량적인 특성을 평가하며 최종적으로 정성적 정량적인 특성을 유지하면서 각각의 모듈을 통합하게 되는데 이러한 과정이 그림 1에 나타나 있다.

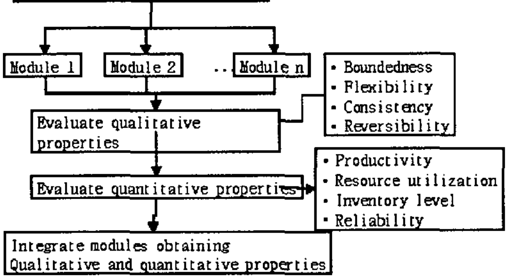

그림 1. 복잡한 제조시스템을 분석하는 모듈접근 방식

생산 프로세스 상의 물류 관리를 지원하기 위하여 BOM을 비롯하여, MRP, OPT, JIT, TQM 등 여러 가지 기법 및 도구들이 개발되어 왔다. 그러나 현재까지 워크플로우 분야에서는 업무 프로세스의 자동화에는 많은 연구가 이루어 졌지만, 생산 프로세스 상의 이러한 물류 기법을 관리 프로세스의 설계 시에 적절히 이용하는 방안을 강구하는 데에는 상당히 소홀하였다. 관리 및 생산이라는 두 도메인 사이의 차이점에도 불구하고, 생산 분야의 물류 기법을 관리 분야에도 응용할 수 있을 것으로 판단된다. 그리하여, BOM은 생산 프로세스 상의 제품 정보뿐만이 아니라, 관리 프로세스 상의 서비스 정보도 포함할 수 있는 것으로 간주하고, BOM 정보를 워크플로우의 설계에 이용할 수 있는 방법을 모색키로 한다.

BOM은 어떤 제품을 제조하기 위하여 어떤 부품/자재들이 얼마나 소요되는가를 명시한 것으로, 제조업에서 흔히 사용되고 있는데 그림 2는 신발을 구성하는 BOM의 한 예를

나타내었다. 이 BOM은 신발이 Sock liner, Upper, Sole unit, Packing material 로부터 조립된다는 것을 나타낸다. 이 중에서 upper부분은 다시 Tip, Toe cap, vamp 등으로 구성되며, Tip 은 다시 Face, Overlay, Underlay 등으로 구성된다. 이러한 BOM을 중심으로 하여 생산계획과 자재조달 및 현장에서의 생산관리가 행해진다. MRP 시스템도 BOM을 생산계획 및 재고 관리의 시발점으로 사용하고 있다.

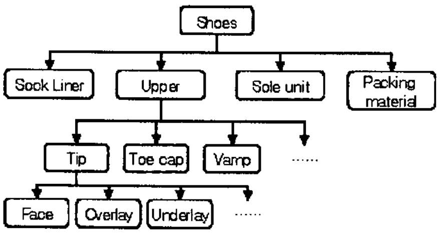

그림 2. 신발을 구성하는 BOM의 예

제조 라인은 위에서 서술한 BOM과 이들 자재간의 흐름을 포함하는 BOP를 이용해서 나타낼 수 있다. 따라서 BOP는 BOM과 프로세스의 흐름을 동시에 나타낼 수 있다. 아래 그림 3은 BOM과 BOP관계를 보여주고 있다.

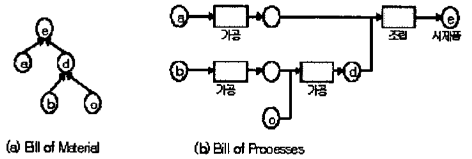

그림 3. BOM과 BOP 관계

위에서 주어진 BOM을 Petri net으로 구현하는 경우 실제로 제조 프로세스는 다양하게 존재 할 수 있다. 즉 그림 4에서 보듯이 위쪽의 routing을 거치는 경우와 아래쪽의 routing을 거치는 경우가 존재한다.

BOM을 BOP로 변환하고 나면 BOP모델은 Petri net 모델로 곧장 매핑이 가능하다. 다음 표 1에서 명확하게 드러나듯이 BOP와 Petri net간에는 place, transition, marking 등에서 거의 1:1로 매핑이 가능한 관계를 보여주고 있다.

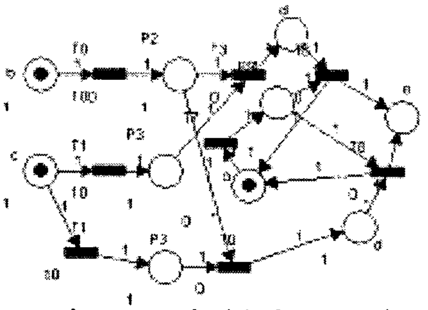

그림 4. BOM이 복수의 routing을 갖는 Petri net으로 모델링 한 경우

표 1. BOP와 Petri net 모델간의 관계

BOP 관계	Petri net
조건/연관관계 종속	Place
사건/업무	transition
case/state	marking
연속적 case 그래프	marking 그래프

Petri net의 확장된 개념중에서 classical Petri net에서 transition에 시간의 개념이 추가된 것이 timed Petri net이다. 시간은 고정된 시간이 고려되는 경우와 시간이 확률분포를 가지는 경우로 전자를 deterministic timed Petri net 이라 명하고 후자를 stochastic timed Petri net으로 명명한다. 여기서 stochastic timed Petri net중에서 어떤 사건은 즉시로 transition이 일어나고 어떤 사건은 확률분포를 가지는 형태가 복합되어 있을 때 이를 generalized stochastic Petri net이라 명하고 본 연구에서는 이러한 일반적인 상황을 대상으로 한다.

3 대상 문제

본 연구에서 적용할 대상문제로서 기계 M1, M2 두 대로 구성된 모듈화 된 제조 cell을 고려하자. 이 cell에서는 두 종류의 부품 X1, X2가 제조되며 각 부품은 공정1, 공정2를 각각 필요로 한다. 부품 X1은 공정1에서는 기계 M1을 필요로 하고 공정 2에서는 기계 M1 혹은 M2를 필요로 한다. 부품 X2는 공정1에서는 기계 M2를 필요로 하고 공정 2에서는 X1과 마찬가지로 기계 M1 혹은 M2를 필요로 한다. 공정 1과 공정 2 사이에는 크기 k의

공통 버퍼가 존재한다. 부품 X1과 X2의 생산 요구량은 각각 q1과 q2이다. 다음 표 2는 제조 cell의 운영 계획을 나타내고 있으며 그림 5는 유연한 운영흐름을 그래픽하게 나타내 주고 있다.

표 2. 제조 cell에서의 제조 스케줄

부품	공정 1	버퍼	공정 2	생산량
X1	M1	k	M1/M2	q1
X2	M2		M1/M2	q2

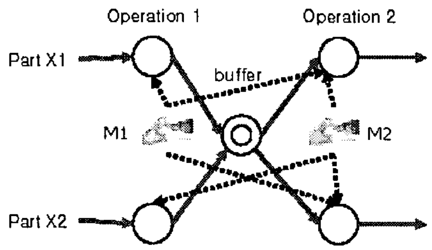

그림 5. 유연한 운영흐름의 그래픽 표현

4. Petri net 모델링

주어진 문제를 Petri net으로 모델링 하기 위해서 다음과 같이 place와 transition을 정의한다. 각각의 place는 제조 cell에서 다음과 같은 operation을 의미하고 있다.

p1, 부품 X1이 공정1 대기
p3, 공정 1 진행
p5, 기계 M 1을 나타냄
p7, 부품 X1 공정 2 대기상태
p9, 부품 X1 이 공정 2를 기계 M1에서 진행 중
p11, 부품 X1 이 공정 2를 기계 M2에서 진행 중
p13, 부품 X1이 공정 1 공정 2를 모두 완료함
p15, 용량 k를 가진 공통 버퍼

또한 각각의 transition은 제조cell에서 다음과 같이 정의될 수 있다.
t1, 부품 X1에 대해서 자재와 기계 M1을 제공
t3, 기계 M1이 공정 1을 수행하는 시간
t5, 부품 X1이 기계 M1을 이용해서 공정 2를 작업대기
t7, 부품 X1이 기계 M2를 이용해서 공정 2를 작업대기
t9, 기계 M1에서 공정 2의 작업시간
t11, 기계 M2에서 공정 2의 작업시간

부품 X2에 대해서도 place에 대해서 p2부터 p14까지 동일한 정의가 가능하며, transition에 대해서는 t2부터 t12까지 동일한 정의가 가능하다.

이러한 place와 transition의 정의에 따라서 Petri net을 모델링 한 것이 그림 6에 나타나 있다.

5. Petri net 모델링 분석

그림 1에서 제시한 것처럼 Petri net의 행태적인 특성은 정성적인 평가 기준을 이용해서 분석해 볼 수 있는데, 이를 위한 기준으로는 Reachability, Boundedness, Liveness, Reversibility, Persistence, Conflict, Deadlock 등이 있으며 이들은 다음과 같이 정의해 볼 수 있다. 우선 정의를 위해서 place에서의 최초의 토큰의 상태를 m_0라고 하면, 그림 6의 최초 상태 (*initial marking*) m_0 = (q1 q2 0 0 1 1 0 0 0 0 0 0 0 0 2)이 된다.

- Reachability: 상태 m_r 은 만약 최초 상태 m_0 로부터 계속해서 firing 할 수 있으면 Reachable 하다고 할 수 있다. 이는 흔히 Reachability 그래프로 표현이 가능하다.
- Boundedness: Petri net은 모든 상태에 있어서 최대 k개의 토큰만을 가질 수 있을 때 최초 상태 m_0 에 관해서 k-bounded되어 있다고 한다. 특히 k-bounded이고 k=1이면 이를 safe 하다고 정의한다.
- Live: Petri net이 Reachability 집합 $R(m_0)$ 내의 어떤 상태에 대해서도 fire가 가능할 때 live하다고 정의한다.
- Deadlock: firing이 더 이상 일어날 수 없는 상태에 도달한 경우 deadlock에 처했다고 할 수 있다.
- Reversible/proper: Petri net이 모든 $m \in R(m_0)$, $m_0 \in R(m)$ 이 만족될 때 reversible 혹은 proper이라고 한다. 최초 상태 m_0는 모든 도달 가능한 상태로부터 도달가능

하다. 이는 곧 Petri net이 재 시작이 가능함을 의미한다.

- Persistence: 많은 제조 시스템에서는 자원이 공유되어져야 하며 Petri net에서 이들 공유자원이 할당되어지는 지를 판단하는 것이 가능하다. Petri net에서 어떤 상태 $R(m_0)$에 대해서 활성화된 (enabled) transition은 그 자신의 firing만으로 비활성화 될 때 이를 Persistent 하다고 정의한다. 이는 conflict가 발생하는 net은 persistent 하다고 할 수 없는데 왜냐하면 동일한 place가 하나 이상의 transition에 입력이 되기 때문이다.

- Synchronic distance: $d(t_a,t_b)$를 두 개의 transition t_a와 t_b 간의 상호 거리를 나타내는 synchronic distance로 정의한다. 특히 FMS cell에서는 자원을 공유하는 일이 많으므로 persistence와 synchronic distance 개념이 중요하게 된다. 두개의 transition이 공통의 place를 공유하는 경우 persistent하지 않으며, 일련의 transition (t_1,t_2,t_3)가 그 자체적으로만 무한히 fire하게 되면 이들은 그 주위의 transition t4와의 synchronic distance를 $d(t_1, t_4) = \infty$ 으로 표시할 수 있다. 따라서 이런 경우 컨트롤러는 공유된 자원간의 공정한 할당을 위한 역할이 중요하게 된다. 만약 transition t_5가 한번 일어날 때까지 t_4가 한번 이상 일어날 수 없다면 synchronic distance는 $d(t_4, t_5) = 1$ 로 표현 가능하다.

이상의 기준에 근거하여 볼 때 그림 6에서 제시된 Petri net 모델은 reachable, bounded, deadlock free, persistent하며, synchronic distance가 무한대인 경우는 없으나 reversible 하지는 않으며, 생산량 q1, g2가 다 fire되고 나면 더 이상 p1, p2에 토큰이 없으므로 이 이후에는 live 하다고 할 수 없다.

6. 결론

본 연구에서는 제조 시스템에서 FMS 라인을 모델링 하기 위하여 복잡한 시스템을 컨트롤이 가능한 작은 모듈로 나누고 이들 각각의 모듈을 generalized stochastic Petri net을 이용하여 모델링을 하고 각각의 모델에 대하여 행태적인 특성을 통하여 시스템을 분석하여 모델링의 적합성을 평가하고자 하였다. 대상 문제로는 두개의 기계가 상호 호환적으로 사용되는 간단한 유연 제조 cell을 대상으로 하여 이를 모델링하고 정성적인 평가기준에 해당하는 행태적인 특성을 이용하여 분석해 보았다.

향후 추가되어야 할 연구내용으로는 시스템의 performance 분석을 위해서 정량적 접근법에 의한 분석으로 가동률이나 고장률, 생산능력, 재고수준 등을 평가하여 생산 제조 시스템의 효율을 극대화 할 수 있는 방안까지 제시하게 될 것이다.

Acknowledgements:

본 연구는 한국 과학재단 특정 기초연구 사업 (R01-2002-0000-00232-0)의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

1. 한용호, 김태운, (2002) BOM 및 Petri net을 이용한 워크플로우 프로세스 자동 생성기의 구현, *2002년 대한산업공학회/한국경과학회 춘계공동학술대회*, KAIST, 대덕, 5월 3일-4일, 916-922.

2. 이준수, 김종근, 정병호, (2002), 제조 셀 모델 플랜트의 운영 소프트웨어의 개발, *IE Interface*, Vol. 15, N0. 4, 364-373.

3. Aalst, W.M.P. van der, (1999), "on the automatic generation of workflow processes based on product structures," *Computers in Industry*, Vol. 39, 97-111.

4. Balduzzi, F., Giua, A., and Seatzu, C. (2001), Modeling and simulation of manufacturing systems with first-order hybrid Petri net, *International Journal of Production Research*, Vol. 39. No. 2, 255-282.

5. Brauer, W., Reisig, W., and Rosenberg, G., (1987), Petri net: Applications and Relationships to other models of concurrency, *Lecture notes in computer science 255*, Springer-Verlag.

6. Chiola, G., Marsan, M., Balbo, G., and Conte, G. (1993), Generalized stochastic Petri net: A definition at the net level and its implementation, *IEEE Transaction on Software Engineering*, Vol 19, N0 2, 89-107, February.

7. Choi, B.K., and Kim, B.H., (2002), MES architecture for FMS compatible to ERP, *International J. of Computer Integrated Manufacturing*, Vol. 15, No. 3, 274-284.

8. Desrochers A. and Al-Jaar, R., (1995), *Applications of Petri net in Manufacturing Systems*, IEEE Press.

9. Dikerhof, M., Didic, M.M., and mampel, U., (1999), "Workflow and CIMOSA-background and case study," *Computers and Industry* Vol. 40, pp 197-205.

10. Ortiz, A., Lario, F., Ros, L., and Hawa, M. (1999), Building a production planning process with an approach based on CIMOSA and workflow management systems, *Computers in Industry*, Vol. 40, 207-219.

11. WfMC, (2003), http://www.wfmc.com.

12. Zimmermann, A., Freiheit, J., and Huck, A., (2001), A Petri net based design for manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, Vol. 39, No. 2, 25.-253.

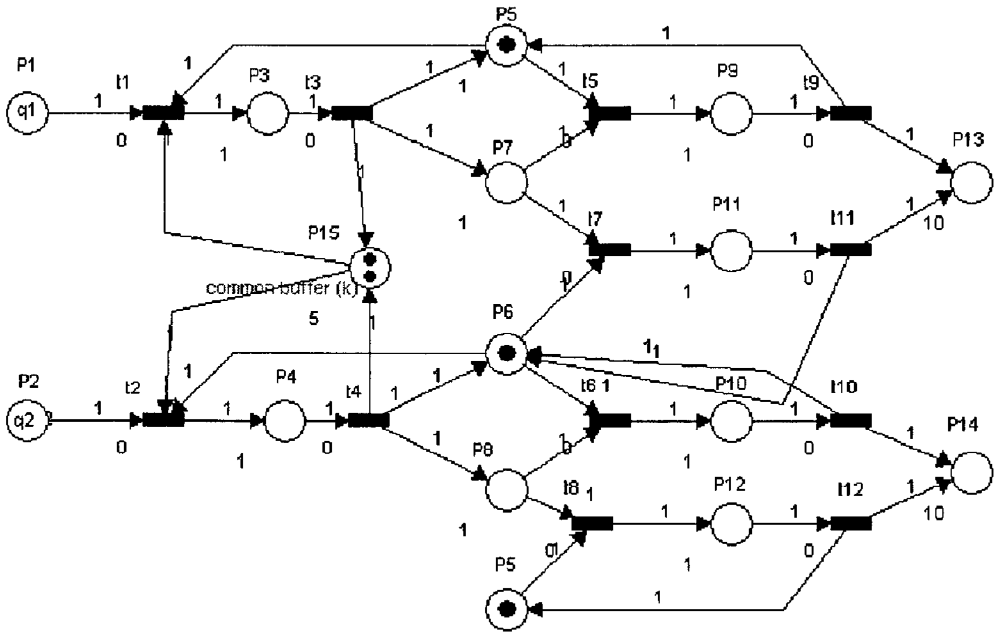

그림 6. 공통 버퍼를 이용한 두 개 부품의 가공과정을 나타내는 Petri net 모델