

페트리 넷을 이용한 제조 셀의 성능평가

김태운^{1*} · 서윤호² · 신동목³

¹경성대학교 산업공학과 / ²고려대학교 산업시스템정보공학과 / ³울산대학교 수송시스템공학부

Petri Net based Performance Evaluation of Manufacturing Cell

Taoun Kim¹ · Yoonho Seo² · Dongmok Sheen³

¹Dept. of Industrial Engineering, Kyungsoong University, Busan, 608-736

²Dept. of Industrial and Systems Engineering, Korea University, Seoul, 136-701

³Dept. of Transportation Systems Engineering, University of Ulsan, Ulsan, 680-749

The Purpose of this paper is to propose performance evaluation schemes of flexible manufacturing cell using a generalized stochastic Petri net. In the competitive and global manufacturing environment, to evaluate the feasibility and manufacturability of a product in the product design stage is highly required. Through this process, all the possible problems which may occur in the manufacturing stage can be fixed in early stage. The scheme of generalized stochastic Petri net utilizing both immediate and exponential distributed transitions are applied to model a manufacturing cell with flexible machines, material handler, transporter and buffers. Performance analyses are performed based on behavioral, structural and quantitative properties. A flexible manufacturing cell is evaluated using a Petri net simulator.

Keywords: Petri net, GSPN, performance evaluation, manufacturing cell

1. 서론

성능평가는 크게 측정과 모델링으로 구성된다. 측정은 실제로 존재하는 시스템에 대해 특정한 조건하에서 그 시스템을 관찰하는 것으로 측정결과는 실험조건에 따라서 변경이 가능하므로 일반성을 갖지는 못하는데, 이에는 측정방법, 벤치마킹, 프로토타입이 있다. 측정방법은 측정조건에 따라 값이 크게 변화할 수 있으므로 측정조건을 인위적으로 설정하여 평가를 행하는 방법으로 벤치마킹이 있다. 이러한 측정방법이나 벤치마킹은 모두 실제로 대상 시스템을 필요로 한다. 그러나 실제로 대상 시스템이 가용하지 않거나 아직 작동이 불가능할 때는 그 시스템을 개략적으로 나타낼 수 있는 대체품의 개발이 필요하며 이를 프로토타입이라 한다. 이러한 세 가지 방법은 모두 시스템의 성능평가를 위해서 대상을 관찰해야 한다. 실제로 제품 개발의 초기 디자인단계에서는 실제 성능평가 대상 시스템이

가용하지 않으므로 측정은 가용하지 않거나 프로토타입을 이용한 실험도 결정되지 않은 많은 변수들에 대한 자세한 사양을 정하는 문제로 인하여 많은 어려움을 겪게 된다.

성능평가의 두 번째 방법인 모델링 방법은 시스템의 중요한 특성에 관한 기술에 근거하는데, 이에는 시뮬레이션과 분석적 방법이 있다. 시뮬레이션에서는 시스템에 대한 사양이 컴퓨터 프로그램으로 내장되어 있는 데 반해 분석적 모델에서는 시스템에 관한 사항이 수학적인 함수로 기술되어진다. 분석의 목적은 성능평가지표, 예를 들면 시스템의 가용도, 대기시간, 장비의 효율 등을 평가하는 것이다. 또한 모델링 방법은 확정적 분포 혹은 확률적 분포를 따르게 된다. 분석대상 중에서 단순한 시스템은 대부분 확정적 행태를 띠고 있지만 복잡한 시스템의 자세한 확정적 현상은 거시적인 확률적 가정에 의해서 접근하는 것이 보다 용이할 수가 있다. 왜냐하면 확정적인 시스템의 자세한 사양을 알기도 곤란하지만 설령 안다고 해도

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구 사업(R01-2002-0000-00323-0)의 지원으로 수행되었음.

*연락처 : 김태운 교수, 608-736 부산시 남구 대연동 110 경성대학교 산업공학과, Fax : 051-621-2454, E-mail : twkim@ks.ac.kr

이를 모두 고려하게 되면 시스템이 너무 복잡하게 될 수가 있기 때문이다. 또한 확률적 모델이 보다 더 정확할 수 있고 일반적인 결과를 보여주며 파라미터를 변화시킴으로써 민감도분석도 가능하다.

모델의 중요한 특성으로 시간의 경과에 따른 시스템 행태를 표현하는 것이다. 시간은 기본적으로 이산적인 수준에서 측정되어지고 분석되어지나 연속적인 상황에서 고려되어지기도 한다.

시스템의 성능평가를 위해서 페트리 넷을 고려할 때 시간이 고려된 Timed Petri Net(TPN)을 대상으로 하는데, 이 경우에도 시간이 place, transition, 아크, 토큰에서 모두 고려가 가능하지만 가장 합리적인 경우인 transition에 시간이 고려된 TPN을 분석 대상으로 한다. 따라서 확률적 분포를 갖는 임의의 지연이 transition에 할당되고 해당 시간이 지나면 이전 place에 있는 토큰이 다음 place로 이전하게 된다. 임의의 지연이므로 어떤 경우는 즉시 transition이 발생하고 다른 경우는 확률적 분포를 갖는 지연이 발생하게 되며 이러한 일반적인 경우를 총괄하는 모델로서 Generalized Stochastic Petri Net(GSPN)을 이용하게 되었다.

GSPN 모델은 동시성과 동기화의 특성을 가지는 시스템의 성능평가에 많이 활용되어 왔다. 페트리 넷을 이용한 FMS 모델링에 관해서 Moore and Gupta(1996)의 리뷰 논문을 들 수 있다. 여기에서는 제조시스템을 flow shop, transfer line, job shop, FMS, 조립시스템, 그 외에 제조시스템으로 분류하고 이들 분야에 적용된 페트리 넷을 제조요소, PN 종류와 정성적/정량적 관점에서 분석하고 있다. 특히 제조요소로는 워크스테이션, 자재 이송시스템, 창고(입/출력 버퍼), 자원 및 제한조건을 선정하고 이들에 대하여 비교평가하였다.

대표적인 적용 논문으로서 Marsan *et al.*(1987)은 하드웨어와 소프트웨어를 포함한 분산된 컴퓨팅 환경에 적용한 예를 제시하고 있으며, Chiola *et al.*(1993)는 GSPN에서 시간을 제외하고도 본래의 정성적인 성질을 가지고 있는 모델을 식별해 내고 우선순위와 억제(inhibitor) 아크를 가지는 모델의 구조를 분석하고 있다. Zimmermann *et al.*(2001)은 제조시스템 디자인의 여러 다른 단계를 종합적으로 지원하는 디자인 엔진을 제시하고 이를 TimeNET(Timed Net Evaluation Tool)이라고 칭하였다. TimeNET은 비 마코비안 지연시간까지를 고려하는 컬러 페트리 넷을 제조시스템의 모델링 및 분석환경으로 제안하고 있다. TimeNET의 구조는 제품사양, 작업계획 등을 포함하는 작업계획 모델과 레이아웃, 자원 등을 포함하는 구조모델로 되어 있고 정성적인 분석과 성능분석을 수행한다. 제조 프로세스의 모델링을 페트리 넷으로 모델링한 것으로는 Rudas and Horvath(1997)를 들 수 있다. NC에서 기계 가공품을 엔지니어가 행하는 실제 사고과정을 모델링으로 접근하고 있다. 먼저 프로세스의 개념을 정립하고, 서브프로세스를 찾아내고, 서브프로세스를 프로세스 개념에 포함시킨다. 제조 프로세스 모델은 프로세스, 정립, 운영 및 NC 사이클의 4 단계로서 구성되어진다. Kusiak and Yang(1993)은 디자인 프로세스에 페트리 넷을 적용

하고 있다. 특히 프로세스의 분할, 복수 자원의 요구사항, 사이클과 같은 프로세스에 페트리 넷을 이용한 디자인 프로세스를 제시하고 있다.

페트리 넷을 이용하는 성능평가 중에서 워크플로 분야에도 활용이 많다. 워크플로 관리가 종전의 컨트롤, 모니터링, 최적화 및 비즈니스 프로세스의 지원 기능에도 활용되고 있다. 제조분야에서 BOM을 이용해서 생산품을 정의해 볼 수 있으며, Petri net을 이용해서 BOM을 자동으로 생성하는 것도 가능하다(van der Aalst, 1999). 제조업무 분야에 워크플로를 적용한 다른 사례로는 BOM을 발전시킨 것으로 BOP(Bill of Processes)를 들 수 있다(Choi and Kim, 2002). BOP는 BOM과 제작공정 정보를 동시에 나타내는 것으로서 부품의 조립/분해 관계와 공정의 선후관계를 명시하며 구성요소로는 부품, 공정 및 관계표시가 있다. 이 분야의 중요한 연구인 CIMOSA(Computer Integrated Manufacturing Open System Architecture)에서는 워크플로 레퍼런스 모델과 유사성을 분석하고 CIMOSA 기반의 워크플로 구조를 제시하고 있다(Dickerhof *et al.*, 1999; Ortiz *et al.*, 1999).

본 연구의 목적은 제조라인의 성능평가를 위해서 페트리 넷을 이용하여 모델링을 하고 실제 유연생산 셀을 대상으로 분석하였다. 제안된 GSPN 모델을 행태적 특성, 구조적 특성 및 정량적 지표에 의해서 성능평가를 실시하였다. 구현을 위해서는 페트리 넷 시뮬레이터를 이용하여 특성을 진단하고 측정지표를 획득하였다. 행태적 분석을 통해서 시스템의 안정성, 신뢰도, deadlock-free 등을 확인 가능하고, 구조적 분석을 통해서 각 자원의 배분을 확인해 볼 수 있다. 정량적 지표를 통해서 기계의 가용도, 생산량, 공정재고의 추이를 예측하였다. 본 연구를 통해서 시스템의 성능평가를 실제 시스템이 가용하지 않은 상태에서 사전에 수행해서 문제점을 개선하고 고칠 수 있는 방안을 제시할 수 있다.

2. 페트리 넷을 이용한 모델링

2.1 모델링 요소(Modeling primitives)

제조라인이나 비즈니스 프로세스는 페트리 넷의 모델링 요소를 이용해서 표현할 수 있다. 프로세스를 분류해 보면, 우선 기본적인 흐름과 직렬적인 배열을 들 수 있다. 두 개 이상의 프로세스가 분리되거나 만나는 것은 Fork 형태의 AND-split과 동기적 흐름의 AND-join으로 나타낼 수 있다. 이들은 동시적인 평행한 프로세스로서 하나의 과업이 동시에 혹은 순서대로 행해지는 경우이다. 평행 프로세스는 하나의 transition으로부터 다수의 과업이 나누어지는 AND-split으로부터 시작되지만 AND-join에서는 선행하는 일들이 다 완료되어야만 transition이 일어나서 만나게 된다. 비동기적 join으로서 OR-join이 있는데, 이는 여러 정보/컨트롤들이 place로 표시되는 하나의 조건으로 모이게 되는 경우이다. 제조 프로세스의 예로는 동일한 부품을 제

작해서 다음 프로세스를 위해서 공통의 장소로 보내는 경우를 들 수 있다. 선택을 나타내는 것으로 OR-split이 있는데, 이는 2개 이상의 기계가 들어오는 자재를 가공하는 경우에 해당한다. 이 경우의 선택은 우선순위, 확률, 혹은 빈도에 따라서 정해진다. 또한 전기회로와 같은 cycle이 있는데 이는 로봇이 특정 부품을 선적하고 하역하는 반복적인 작업을 기술하는 데 사용할 수 있다. 또한 cycle은 기계가공에서 idle 상태를 나타내는 데 이용할 수 있다. 상호 배반적인 관계를 나타내는 것으로 XOR이 있으며, 이는 공통의 자원을 2개 이상의 객체가 상호 배반적으로 사용하고자 할 때 이용할 수 있다. 이러한 모델링을 위한 기본요소가 <그림 1>에 나타나 있다.

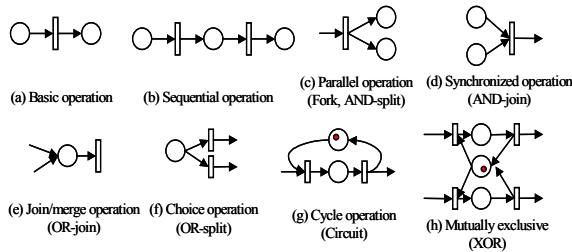


그림 1. 페트리 넷을 이용한 모델링 요소.

2.2 GSPN 모델링

추계적 페트리 넷(SPN; Stochastic Petri Net)은 transition이 시간을 소요하며 지연시간이 지수분포를 가지는 확률변수이다. 지수분포의 무기역성 성질로 인하여 transition으로 인한 활동은 어떤 상태에서도 다시 시작이 가능하며, 따라서 SPN은 연속적인 마코프 체인과 유사한 행태를 가진다. SPN의 일반적인 형태로서 GSPN은 따라서 소요 시간이 확률분포를 따르는 경우와 즉시로 transition이 일어나는 경우로 구성되며, 전자를 tangible marking이라 하고, 후자를 vanishing marking이라 부르는데, GSPN의 정의는 다음과 같다.

정의 1. GSPN을 다음과 같은 7-tuple로 정의한다.

- GSPN=(P, T, I, O, F, W, m₀), where
- P = {p₁, p₂, ..., p_n}, 유한집합의 place,
- T = {t₁, t₂, ..., t_m}, 유한집합의 transition,
- I ⊆ (P×T), P×T → {0,1}, P에서 T로의 연결집합
- O ⊆ (T×P), T×P → {0,1}, T에서 P로의 연결집합
- F ⊆ (P×T) ∪ (T×P), transition T에 대한 firing time의 분포
- W: F → {1,2,3,...}, arc에 관한 가중치 함수
- m₀: P → {1,2,3,...}, 최초 marking
- P ∩ T = ∅, P ∪ T ≠ ∅,

GSPN 모델의 예로서 다음 <그림 2>의 경우를 보자. 여기에는 5개의 transition이 즉시로 일어나며, 3개(T3, T4, T8)는 지수 분포를 갖는 형태를 취하고 있다. transition T1과 T2는 동일한

입력 place를 필요로 하므로 구조적으로 상충되는 관계이다. T5와 T6도 상호간에 자유로운 선택이 가능하므로 상충관계이다. T7만이 즉시 transition 중에서 상충이 발생하지 않는다. 본 모델을 시뮬레이션해 본 결과, 즉시 transition이 발생하는 경우 중에서 2개 이상의 즉시 transition 조합은 {T1, T2}, {T1, T7}, {T2, T7}, {T5, T6}, {T1, T5, T6}, {T2, T5, T6}의 경우이다.

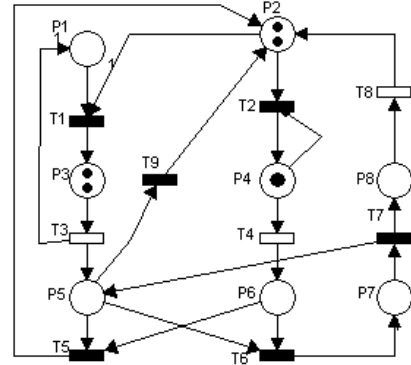


그림 2. GSPN 모델의 예(■ 즉시 transition, □지수분포).

2.3 성능평가 기준

페트리 넷 기반 성능평가의 기준은 크게 정성적인 방법과 정량적인 방법으로 구분해 볼 수 있다. 정성적인 방법에는 구조를 분석하는 방법과 행태적인 특성을 분석하는 것으로 나눌 수 있다. 정량적인 방법은 페트리 넷을 시뮬레이션을 통해서 분석하는 방법이므로 다음 절에서 논하기로 한다.

정성적 평가에서는 시스템이 의도된 기능을 발휘하고 안전성을 가지는지에 대한 근본적인 문제들을 확인한다. 이는 시간의 경과와는 무관한 특징을 검정하게 된다. 기술적인 관점에서 정성적인 평가의 방법을 애니메이션, 정적인 분석과 동적인 분석으로 구분해 볼 수 있다.

애니메이션은 모델 개발자로 하여금 의도된 시스템의 행태를 볼 수 있게 해 준다. 이는 비공식적인 디버깅 기술로서 편리하다. 정적인 분석은 모든 상태공간을 생성하는 것을 배제하고 넷의 축소와 선형대수방법을 이용하는데 구조분석이 이에 속한다. 정적인 분석은 넷의 최초 상태(initial marking)에는 무관하고 incidence matrix로 표현되는 넷의 구조에만 의존하게 된다. 동적인 분석은 시스템의 상태공간을 생성한다. 완전한 Reachability graph가 여기에 속하나 그래프가 너무 복잡하므로 압축과 축소방법을 이용하여 보다 간단한 그래프를 생성해 내기도 한다. 동적 분석은 복잡한 질문에 대한 해답을 제공하기도 하지만 실제로는 상태공간이 너무 확장되어서 사용이 불가능하게 된다.

일반적으로 페트리 넷을 이용한 모델의 특성분석은 크게 행태적 특성과 구조적 특성으로 구분해 볼 수 있다. 이는 모델에 최초로 할당된 토큰의 숫자와 관계있는 것으로, 최초 토큰의 숫자에 관계있는 경우는 행태적 특성이고 최초 토큰의 숫자와

무관한 경우는 구조적 특성에 해당한다. 앞에서 서술한 정적인 분석은 구조적 분석에 속한다고 할 수 있다. 행태적 특성에는 도달 가능성(Reachability), 한정성(Boundedness), 생존성(Liveness), 가역성(Reversibility), 지속성(Persistence), 공정성(Fairness), 동기적 거리(Synchronic distance) 등이 사용된다.

3. 페트리 넷 기반 성능평가

3.1 적용 도메인

생산시스템은 포드자동차 회사의 T-라인 이후로 계속 변화 발전되어 왔다. 대량생산의 장점은 라인의 안정성과 컨트롤에 근거한 효율이었다. 보다 더 유연한 시스템은 floor shop으로서 컨베이어 상에서 일부 기계나 작업자를 건너뛰게 된다. Job shop에서는 기계의 순서를 정해 놓은 작업계획이 각각 다른 제품에 대해서 각기 따로 존재한다. 이 경우에는 기계에서의 가공순서는 기계가 놓여 있는 물리적인 순서에 따르지 않게 된다. 유연생산시스템은 전통적인 대량생산라인의 효율성 안정성과 job shop 라인의 유연성 적응성의 장점을 추구하고자 도입되었다.

본 모델을 적용하기 위해서 채택된 시스템이 <그림 3>에 나타나 있다. 본 시스템은 2개의 워크스테이션으로 구성되어 있고 2개의 컨트롤 유닛이 실제적인 컨트롤을 위해서 사용되고 있다. 각 컨트롤 유닛에 있는 전반적인 라인은 실제 워크스테이션을 위한 분산된 로컬 의사결정 유닛뿐만 아니라 물리적으로 분산된 유닛을 나타낸다.

분산된 유닛들은 데이터 교환을 위해서는 컴퓨터 네트워크로 연결되어 있고 워크스테이션 간의 부품전달은 AGV 같은 수송시스템을 이용한다. 실제 시스템은 자재 저장소, 자재 가공기계(MP: Material Processor), 자재 보조장치(MH; Material Handler, 로봇), 자재 이송장치(MT: Material Transporter)와 버퍼로 구성되어 있다.

기계는 다른 형태의 부품을 가공할 수 있다. 여러 기계들이 각기 상이한 가공시간을 가지므로 버퍼가 필요하다. 이송장치들은 컨트롤 시스템의 명령에 의해서 부품을 EMS 내의 한 곳에서 다른 곳으로 이동할 수 있다. 컨트롤 시스템은 재고를 최소로 유지하면서 가능한 최대의 산출과 시스템의 활용도를 높이도록 부품의 라우팅을 결정한다. <그림 4>는 실제 시스템을 모델화하여 개념도로 나타낸 것이다.

본 시스템에서의 업무 프로세스는 다음과 같다. 원재료는 AS/RS에 저장되어 있다. 부품에 대한 작업주문이 내려지면 이는 워크스테이션 #1으로 전달된다. IBM 7545 로봇은 AS/RS로부터 원자재를 받아서 버퍼, 자재 이송장치 혹은 자재 가공기계로 전달한다. 자재는 이송장치인 AGV를 통해서 다른 워크스테이션으로 이동한다.



그림 3. 실험에 사용된 기계장비.

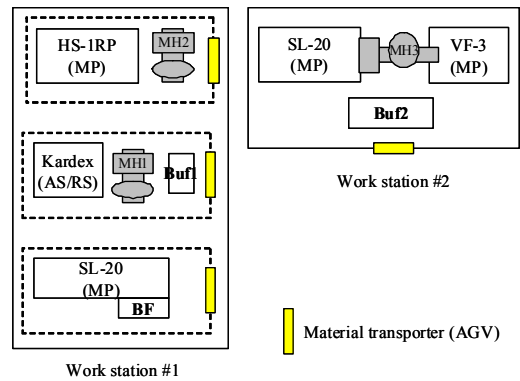


그림 4. 실험에 사용된 기계장비 개념도.

3.2 대상 문제

본 시스템이 적용할 문제로서 <그림 5>와 같은 간단한 박스를 선택하였다. 이는 받침인 ‘can’과 뚜껑인 ‘lid’로 구성되어 있고 간단한 가공을 거쳐서 상호 조립되도록 되어 있다. 이 제품에 사용될 자재는 Kardex(AS/RS)로부터 제공되며 머시닝 센터에서 가공된 후 다시 Kardex에 저장되는 것으로 하였다.

선택한 가공품에 대해서는 많은 공정계획이 가능하지만 그 중 가능한 하나의 계획이 채택되었으며, <표 1>에 나타나 있다(Lee, 2002). 페트리 넷을 이용한 시뮬레이션 시나리오가 이 공정계획에 기초해서 수립되어졌다.



그림 5. 시험평가를 위해 사용된 부품.

표 1. 각 구성품에 대한 공정계획

구분	공정#	기계	설 명	시간
can	10	MH1	AS/RS로부터 자재 출고	*
	20	AGV	자재를 SL-20BF으로 이동	1
	30	SL-20BF	can에 facing 공정	1
	40	SL-20BF	can의 중심에 드릴 공정	1
	50	SL-20BF	can에 d=1.5" boring	1
	60	SL-20BF	can의 내부 바닥 finishing	1
	70	AGV	can을 HS-1RP로 이송	1
	80	MH2	can을 HS-1RP에 탑재	*
	90	HS-1RP	can의 바닥에 surfacing	2
	100	HS-1RP	can의 옆 면에 grinding	2
	110	AGV	can을 Buf1로 옮김	1
	120	MH1	can을 AS/RS에 저장	*
lid	10	MH1	AS/RS로부터 자재 출고	*
	20	AGV	자재를 Buf2로 옮김	1
	30	MH3	자재를 SL-20에 탑재	-
	40	SL-20	lid의 바닥을 facing	2
	50	SL-20	lid contouring	2
	60	MH3	lid를 VF-3에 탑재	-
	70	VF-3	lid 상단에 'PSU' 글자 새김	4
	80	AGV	lid를 Buf 1으로 옮김	1
	90	Kardex	can을 AS/RS에 저장	-

고, 자재로부터 부품의 가공은 place와 transition의 조합으로 이루어져 있다. 페트리 넷 시뮬레이터를 이용하여 주어진 문제에 대한 GSPN 모델이 <그림 7>에 나타나 있고, <표 2>는 모델에 사용된 place를 설명한다.

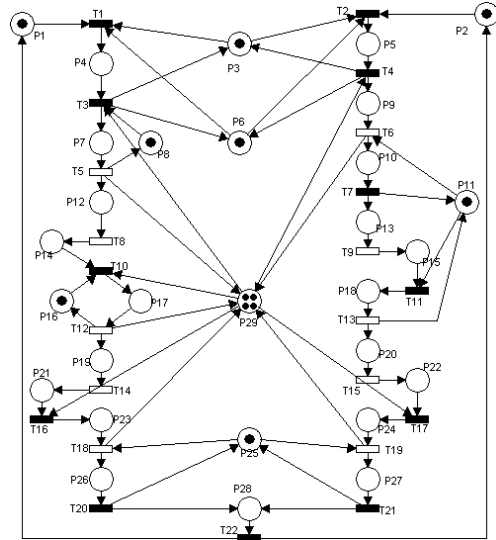


그림 7. 페트리 넷 모델링.

3.3 페트리 넷 모델링

FMS 모델의 구조는 평행으로 가동되면서 상호간에 경쟁하는 작업에 의해서 사용되고 서로 협력하는 자원, 즉 기계의 집합이다. 선택한 박스 가공에 대한 문제를 FMS 환경에서 GSPN을 이용하여 모델링하였다. 본 모델은 앞에서 제시된 공정계획에 따라서 수립되었으며, 작업대상의 이동, 설치, 버퍼와 가공이 주요 활동사항이다. 대상 시스템의 레이아웃을 고려한 상위 수준의 모델링이 <그림 6>에 나타나 있다. 본 모델에서는 place나 transition이 명시되지 않고 주요 객체들과 그들 간의 흐름만을 나타내고 있다.

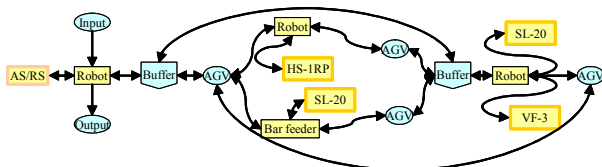


그림 6. 상위 수준의 페트리 넷 모델.

위에서 제시된 상위수준의 모델에 기초하여 구체적인 하위 수준의 모델을 개발하였다. 시스템의 중요한 구성요소인 AS/RS, AGV, 로봇의 가용 여부는 주로 초기 토큰으로 모델링되었

표 2. Place 설명

PI	설 명	PI	설 명
P1	Can	P16	MH-2 is available
P2	Lid	P17	Install 'Can' to HS-1RP
P3	AS/RS	P18	Install 'Lid' to VF-3
P4	Can is on Buffer 1	P19	Operation in HS-1RP
P5	Lid is on Buffer 1	P20	Operation in VF-3
P6	MH-1 is available	P21	End of op in HS-1RP
P7	Move 'Can' to SL-20BF	P22	End of operation in VF-3
P8	Bar feeder is available	P23	Move 'Can' to Buffer 1
P9	Move 'Lid' to Buffer 2	P24	Move 'Lid' to Buffer 1
P10	Install 'Lid' to SL-20	P25	MH1 is available
P11	MH-3 is available	P26	Store 'Can' to AS/RS
P12	Operation in SL-20BF	P27	Store 'Lid' to AS/RS
P13	Operation in SL-20	P28	AS/RS is available
P14	End of op in SL-20BF	P29	AGV is available
P15	End of op in SL-20		

3.4 성능평가 및 분석

페트리 넷 모델의 분석은 주로 정성적 분석과 정량적 분석으로 구성된다. 정성적 분석에는 행태적 특성과 구조적 특성이 고려된다. 행태적 특성은 넷의 초기 토큰 상태에 의해 좌우되고, 구조적 특성은 페트리 넷의 구조에 의존하게 되며, 최초의

상태나 firing 방식에 영향을 받지 않는다. 제조시스템에 있어서 이것은 매우 중요한 성질인데, 왜냐하면 모델이 레이아웃에만 의존하고 시스템이 관리되는 형태에는 의존하지 않기 때문이다. 구조적 분석의 항목에는 레이아웃, 자원의 가용도, 관리시스템 등이 있다.

(1) 구조적 특성에 의한 성능분석

정성적인 분석 중에서 행태적인 분석은 이미 앞에서 논하였고, incidence 행렬에 기초한 구조적 분석에 의해서 시스템을 평가해 보고자 한다. GSPN의 정의로부터 m_0 를 모델의 place에 있는 최초 토큰으로 구성된 시스템의 초기 상태(initial marking)를 나타낸다고 가정한다. incidence 행렬은 $(n \times m)$ 크기이며 $A = \{a_{ij}\}$ 로 정의하자. 시스템의 최종 상태(final marking) m_f 는 초기 상태 m_0 로부터 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$m_f = m_0 + Au \tag{1}$$

여기서, u 는 firing 벡터 u_i 의 합계, $i = 0, 1, 2, \dots, f-1$.

이것으로부터 P-invariant 는 다음 식을 만족하는 음이 아닌($n \times 1$) 정수 벡터이다.

$$x^T A = 0 \tag{2}$$

식 (1)의 양변에 x^T 를 곱하면

$$x^T m_f = x^T m_0 + x^T Au \tag{3}$$

식 (2)와 (3)을 합하면

$$x^T m_f = x^T m_0 \tag{4}$$

식 (4)로 부터 m_0 에 있는 최초 토큰을 P-invariant로 가중치를 곱한 값은 일정하다.

또한 T-invariant는 다음을 만족하는 음이 아닌($m \times 1$) 정수 벡터이다.

$$Ay = 0 \tag{5}$$

식 (1)로부터 $y = u$ 일 때, 다음의 식 (6)이 유도된다.

$$m_f = m_0 \tag{6}$$

이는 firing count 벡터가 T-invariant와 동일하면 최종 마킹은 최초 마킹과 동일하다.

이상의 성질을 확인하기 위해서 <그림 7>의 GSPN 모델을 평가하였다. 우선 incidence 행렬 A 를 작성하였다. Martinez and Silva(1982)는 행렬 A 로부터 페트리 넷의 invariants를 유도하는 효과적인 알고리즘을 제안하였는데, 핵심은 상호 독립적인 invariants의 최소 집합을 찾는 것이다. 이 알고리즘을 행렬 A 에 적용해 보면 P-invariants가 다음과 같이 구해진다. 우선 place 벡

터 x 를 다음과 같이 가정하자.

$$x = (P_1, P_2, P_3, \dots, P_{29}) \tag{7}$$

식 (2)로부터 7개의 P-invariants가 얻어진다. 최초 마킹은 $m_0 = (1\ 1\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 0\ 1\ 0\ 0\ 0\ 4)$ 으로 주어지므로 이를 식 (4)에 적용하면 아래와 같은 P-invariants가 도출된다.

$$\{P_4, P_5, P_6\}, \{P_7, P_8\}, \{P_{16}, P_{17}\}, \{P_{10}, P_{11}, P_{18}\}, \{P_{25}, P_{26}, P_{27}\} \tag{8}$$

$$\{P_2, P_5, P_6, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{13}, P_{15}, P_{18}, P_{20}, P_{22}, P_{24}, P_{25}, P_{28}, P_{29}\} \tag{9}$$

$$\{P_1, P_3, P_4, P_6, P_7, P_8, P_{12}, P_{14}, P_{16}, P_{17}, P_{19}, P_{21}, P_{23}, P_{25}, P_{28}, P_{29}\} \tag{10}$$

이상의 식 (8)에 나타난 p-invariants는 MH1, SL-20BF, HS1-RP, H2, MH3, AS/RS의 활동을 각각 나타낸다. 식 (9), (10)은 ‘LID’와 ‘CAN’의 생산과정을 나타내 주고 있다. 같은 방법으로 식 (5)를 이용해서 T-invariants를 구할 수 있다.

(2) 정량적 특성에 의한 성능분석

제한된 모델의 정량적인 특성에 의한 성능분석을 위해서 페트리 넷 시뮬레이터를 이용해서 평가하였다. 선택된 성능분석 지표는 각 기계의 가용도, 각 부품의 생산량, 각 공정중의 재고 수준이다.

<그림 8>은 4대의 기계 중 1대의 가공시간을 변화시키는데 따른 기계의 가용도(Utilization)를 보여준다. 모든 기계에서의 평균 소요시간은 4분으로 설정되어 있다. 먼저 (a)는 기계 SL-20BF의 가공시간을 1부터 16까지 변화시킬 때 따른 기계 4대의 가용도를 나타낸다. SL-20BF의 가용도는 소요시간이 증대할수록 1에 접근해 가고 있으며 그 외의 기계들은 가용도가 떨어지게 된다. 왜냐하면 SL-20BF에서 병목현상이 생기므로 다른 기계는 starving 상태가 되기 때문이다. (b), (c), (d)도 HS-1RP, SL-20, VF-3의 기계가공 시간이 변화함에 따른 다른 기계들의 가용도를 보여주고 있다. (b)의 경우 HS-1RP의 가공시간이 증가할 때 SL-20BF와 HS-1RP의 가용도가 같이 증가하고 있다. 기계장비들의 배치에서 볼 때에도 이들 두 기계는 워크스테이션 2에서처럼 서로 같이 붙어 있지 않고 떨어져 있으므로 HS-1RP의 가공시간에 관계없이 SL-20BF는 항상 일정한 가용도를 유지하고 있다.

<그림 9>는 각 유닛에 있는 가공시간 변화에 따라서 ‘can’과 ‘lid’의 생산량 변화를 보여주고 있다. 기계가공 시간이 증가함에 따라서 각 부품의 생산량은 감소하고 있음을 나타낸다. <그림 10>은 가공시간 변화에 따른 각 부품의 공정상의 재고를 나타낸다. 각 워크스테이션에서 첫 번째 기계의 가공시간이 증가하면 부품이 첫 번째 기계에 오래 머물게 되므로 공정상의 재고가 감소하지만 두 번째 기계의 가공시간이 증가하면 공정상의 재고가 증가하는 현상을 보여주고 있다.

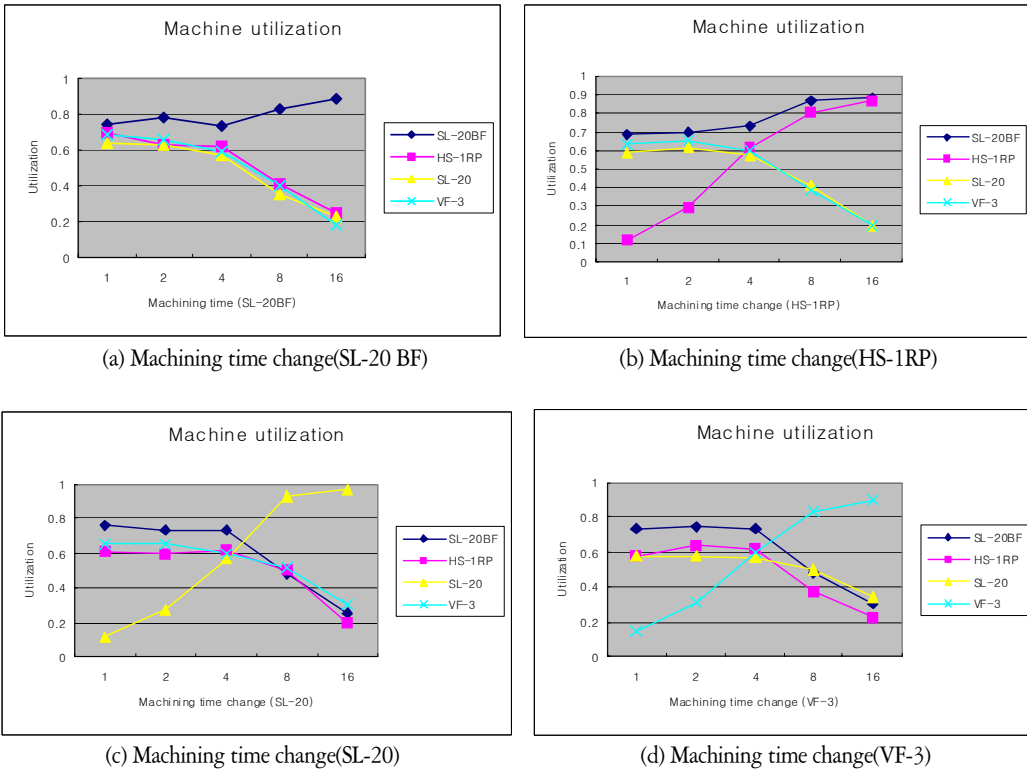


그림 8. 기계 가공시간 변화에 따른 Machine utilization.

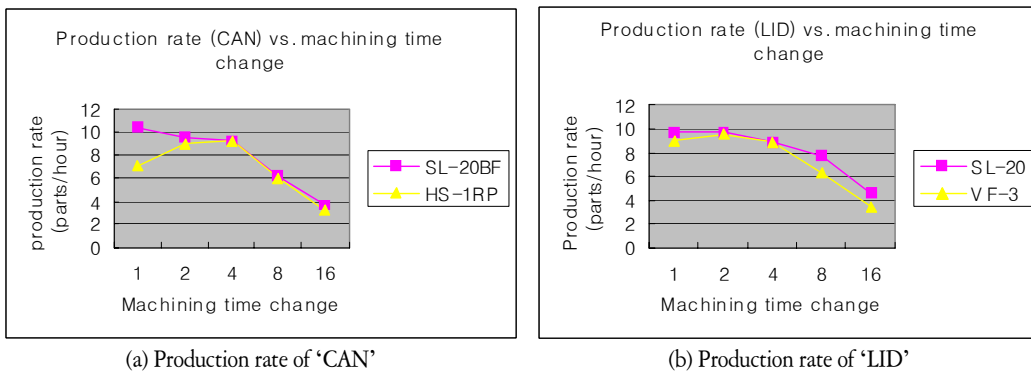


그림 9. 기계 가공시간 변화에 따른 average production rate per hour.

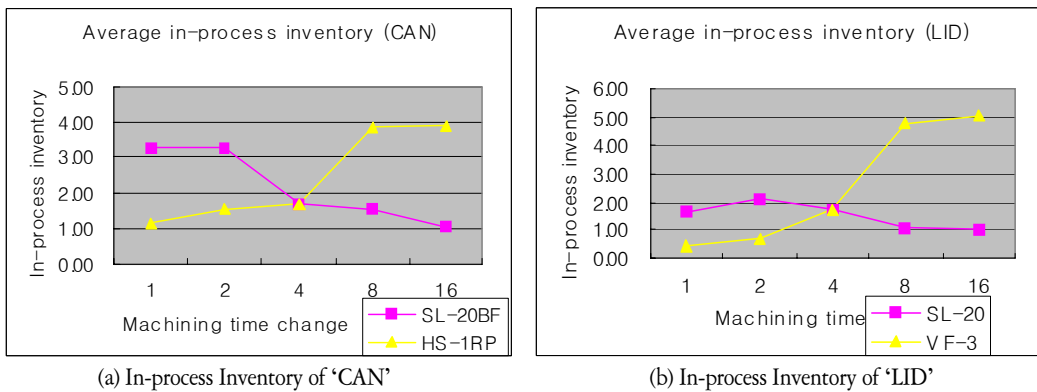


그림 10. 기계 가공시간 변화에 따른 공정 재고수준.

4. 결론 및 추후 연구 분야

본 연구에서 페트리 넷을 이용한 모델링 및 시험평가를 유연생산 셀을 대상으로 분석하였다. 시험평가에 사용된 도메인은 자동창고, 자재 이송장비, 로봇, 버퍼 및 가공용 자동화 기계로 구성된 머시닝 센터를 대상으로 하고 있다. 제안된 GSPN 모델을 행태적 특성, incidence 행렬을 이용한 구조적 특성 및 정량적 지표에 의해서 시험평가를 실시해 보았다. 행태적 특성으로는 페트리 넷 시뮬레이터를 이용해서 시스템의 boundedness, deadlock-free, liveness, reversibility를 확인하였다. 구조적 특성을 위해서는 P-invariants와 T-invariants를 이용해서 분석하였으며 이를 통해서 기계나 로봇과 같은 자원의 배분상태를 평가하고, 부품별 생산과정을 확인해 볼 수 있었다. 정량적 평가를 위해서는 기계별 가용도, 생산량, 공정재고의 추이를 시뮬레이션하였다.

성능평가는 측정과 모델링의 측면에서 고려해 볼 수 있다. 특히 동시공학을 위해서는 제품의 디자인 단계에서 사전에 프로토타입의 제조 및 생산과정을 사전에 예측해 볼 필요가 있는데, 이 경우는 실제 제품이 가용하지 않으므로 모델링 기법을 이용한 관련 성능 및 시스템의 예측이 필요하게 된다. 이를 위해서 페트리 넷 기반 모델링 방법은 아주 유용한 사전 시험평가 수단을 제공해 주고 있다.

향후의 연구 분야로는 정량적 분석을 위한 성능측정 지표를 더 많이 개발하고, 기계가공 조건과 공정관리 조건을 좀더 명확히 하여 시험평가의 정확도를 높이는 것이 요구된다. 간단한 모델의 경우는 추계적 분석에 의한 수리적인 모델에 의한 시험평가를 같이 수행해 볼 수가 있다. 그러나 문제가 조금만 복잡해져도 수리적인 접근이 곤란하게 된다. 따라서 페트리 넷 모델의 검증을 위해서는 복잡한 문제에도 접근이 가능한 전통적인 시뮬레이션을 동시에 수행해서 결과를 비교해 보는 것이 보다 더 현실적인 방안이 될 것이다.

참고문헌

Aalst, van der.(1999), On the automatic generation of workflow processes based on product structures, *Computers in Industry*, 39, 97-111.

Choi, B.K. and Kim, B.H.(2002), MES architecture for FMS compatible to ERP, *International J. of Computer Integrated Manufacturing*, 15(3), 274-284.

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*, 19(2), 89-107.

Dikerhof, M., Didic, M. and Mampel, U. (1999), Workflow and CIMOSA-background and case study, *Computers and Industry*, 40,197-205.

Kusiak, A. and Yang, H.(1993), Modeling the design process with Petri nets, *Concurrent engineering*, edited by Parsaci, H. and Sullivan, W., Chapman and Hill.

Lee, S.(2002), An architecture and implementation of a distributed computer-controlled shop floor system using a federation object coordinator. *Master thesis, The Pennsylvania State University, Department of Industrial and Management Systems Engineering.*

Marsan, M.A., Balbo, G. and Conte, G. (1987), *Performance models of multiprocessor systems*, Cambridge, MA: MIT press.

Martinez, J. and Silva, M.(1982), A simple and fast algorithm to obtain all invariants of a generalized Petri net, in *Application and Theory of Petri nets*(C. Girault and W. Reisig, eds.), New York: Springer-Verlag, 301-311.

Moore, K. E. and Gupta, S. M.(1996), Petri net models of flexible and automated manufacturing systems: a survey, *International Journal of Production Research*, 34(11), 3001-3035 .

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*, 40, 207-219.

Rudas. I. J. and Horvath, L.(1997), Modeling of manufacturing processes using a Petri-net representation, *Engineering Application of Artificial Intelligence*, 10(3), 243-255.

Zimmermann, A., Freiheit J. and Huck, A.(2001), Petri net based design for manufacturing systems, *International Journal of Production Research*, 39(2), 25-253.



김 태 운
 서울대학교 산업공학과 학사
 KAIST 경영과학과 석사
 Pennsylvania State University 산업공학과 박사
 현재: 경성대학교 산업공학과 부교수
 관심분야: 페트리넷 모델링, 지능 에이전트, 제품개발



신 동 목
 서울대학교 기계설계학과 학사
 KAIST 기계공학과 석사
 Pennsylvania State University 산업공학과 박사
 현재: 울산대학교 수송시스템공학부 부교수
 관심분야: 지능형 시스템, CAPP, 디지털 생산, 생산자동화



서 윤 호
 고려대학교 산업공학과 학사
 Pennsylvania State University 산업공학과 석사
 Pennsylvania State University 산업공학과 박사
 현재: 고려대학교 산업시스템 정보공학과 부교수
 관심분야: 제조, 조립 및 물류 시스템의 VR 적용 지능설계