

PETSIM : 생산시스템의 설계 및 분석을 위한 Simulation 도구

임 동 순 *

Abstract

Simulation has been recognized as an invaluable tool in designing and analyzing manufacturing systems. In this paper, a Petri net based simulation tool to facilitate the simulation projects in manufacturing area is presented. To simulate a manufacturing system, three models are developed; a Petri net model, a monitor, and a token control function. While hardware objects in manufacturing systems are modeled by Petri net objects, cell level control functions are separately modeled and integrated with a Petri net model so that they resolve conflicts occurring in Petri net execution. The monitor is a model regarding the information flow between Petri nets and token control functions. The facilities of the developed tool are presented. Also, a modeling procedure with the tool is illustrated via a case study.

1. 서론

페트리 넷(Petri nets)은 비동기성(asynchronous)과 동시성(concurrency)의 성격을 지닌 시스템을 잘 표현하는, 간단하고도 우수한 모델링 도구이다. 페트리 넷은 함축적으로 표현될 수 있을 뿐만 아니라 컴퓨터를 이용하여 실현될 수도 있다. 기본적인 페트리 넷은 방향을 가진 선(directed arc)으로 연결되는 두가지 형태의 노드(node), place와 transition으로 구성된 그래프(graph)이다. Transition으로 연결된 place를 입력 place라 하고, transition으로부터 연결된 place를 출력 place라 한다. 만약, 어느 transition의 모든 입력 place가 marking되었다면(token이 있다면), 이 transition은 enable 되었다고 하고, 즉시 fire될 수 있다. Transition firing 규칙은 transition firing에 따른 넷의 변화를 관찰한다. 즉, 한 transition이 firing 될때 입

력 place의 token들은 제거되고, 출력 place에는 새로운 token들이 생성된다. 이와 같은 일련의 firing은 넷의 변화를 결정한다.

최근에 이르기 까지 페트리 넷은 다양한 시스템의 모델링과 분석 뿐만 아니라 이산적인 성격을 지닌 생산시스템의 시뮬레이션에 효과적으로 이용되어 왔다. 많은 저자들은 생산 시스템의 hardware에 관한 시뮬레이션과 생산 시스템의 조정을 페트리 넷으로 표현될 수 있음을 보인바 있다[4,10,11,13,16,17]. Torn[15]은 이산사건 시뮬레이션에 이용하기 위한 페트리 넷의 확장을 제안하였다. 즉, inhibitor arc, timed nets, coloured tokens, queues, test arcs, 그리고, interrupted arcs 등의 확장을 통해 시뮬레이션에서의 페트리 넷 이용을 용이하도록 하였다. Alanche 등[2]은 페트리 넷에 기초한 시뮬레이션 도구인 PSI의 구조를 발표하였다. PSI는 token player, calendar, 그리고, 통계

*한남대학교 산업공학과

적 기능으로 구성되어 있다. 생산 시스템에의 응용으로서, Bruno 등[5]은 확장된 페트리 네트인 PROT Net를 제안하였고, 객체 지향적 프로그래밍에 기초한 시물레이션 도구를 개발하였다.

페트리 네트를 생산시스템의 시물레이션에 효과적으로 이용하기 위한 기본적인 페트리 네트외의 확장과 다수의 도구들이 제안되었음에도 불구하고, 유연생산시스템과 같은 복잡한 시스템을 표현하는데는 제한이 있다. 비록 페트리 네트가 유연생산 시스템의 특성인 분산성, 동시성, conflict 등을 표현하는데 유용하나, scheduling 이나 dispatching등과 같은 상위 레벨의 조정기능들을 표현하는데는 부적합하다고 인식되어 왔다[6,7,12]. 이러한 점을 극복하기 위해 페트리 네트와 다른 모델링 도구를 결합하는 방법론들이 제안되었다. 상위레벨의 조정기능을 logical expression [8], expert system[12], SI-net[6]등으로 표현하고, 하위레벨의 조정기능과 물리적 요소들을 페트리 네트로 표현하는 방법들이 그것이다.

간략하게 설명된 바와 같이 페트리 네트가 유연생산시스템과 같은 복잡한 생산시스템의 시물레이션에 효과적으로 이용되기 위해, 네트의 모델링 능력을 증가 시켜야 하고, 상위레벨의 조정기능들은 따로 모델링되어 네트와 결합되어야 한다. PETSIM(PETri net based SIMulation tool for the design and analysis of manufacturing systems)은 이러한 목적에서 개발되었다. PETSIM하에서의 시물레이션 모델은 페트리 네트, 모니터, token 조정기능의 세가지 형태로 구성 되어있다. 페트리 네트 모델은 생산시스템의 hardware object와 상응되도록 구분, 명세된 페트리 네트 객체로 구성되며, 모니터는 페트리 네트 모델에서 발생한 정보를 받아 token 조정기능에 필요한 조정요청 및 주요 정보를 보낸다. Token 조정기능은 모니터에서의 조정요청을 받아 페트리 네트 모델에 token 움직임에 관한 명령을 하달한다.

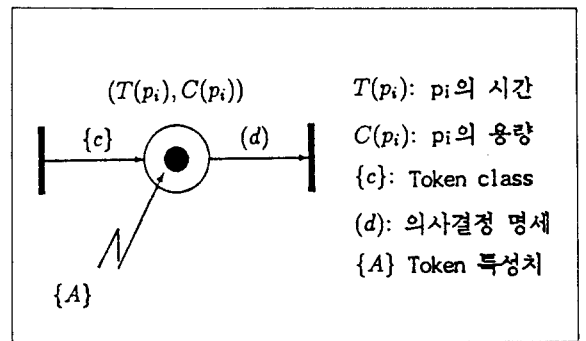
2. 생산시스템의 모델링을 위한 페트리 네트

2.1 페트리 네트 명세

PETSIM에서 사용된 페트리 네트는 일반적인 네트 성분인 place, transition, directed arc, token 외에 inhibitor arc를 기본성분으로 한다(페트리 네트에 대한 자세한 설명은

Peterson[14] 을 참조). Inhibitor arc는 연결된 place에 token 이 있을 경우 연결된 transition의 firing을 방지한다. 각 기본성분들에는 다음과 같은 특성들이 부가된다(그림 1).

1. 각 place에는 시간 과 용량이 주어진다.
2. 각 token들은 하나의 객체로 인식되며, 고유한 데이터 구조를 갖는다.
3. transition의 출력 arc에는 token 흐름을 명시한다.
4. transition의 입력 arc에는 transition fire에 대한 의사결정을 명시할 수 있다.



(그림 1) 생산시스템의 모델링을 위한 페트리 네트 명세

원으로 표현되는 place, p_i 는 크게 두가지 특성치인, 시간 $T(p_i)$ 과 용량 $C(p_i)$ 를 갖는다. 한 token이 시간지연을 갖는 place에 도달하였을때 token은 즉시 processing state로 된다. 설정된 시간지연 $T(p_i)$ 후에 token의 상태는 waiting state로 바뀐다. 각 place들은 marking될 수 있는 token의 수인 용량이 설정 되어 있다. 점으로 표현되는 token은 생산 시스템에서의 자원이나 물리적 흐름객체(자재, tool, pallet, 수송차량 등)를 나타낸다. 각 token은 color로 표현되는 어느 token class에 속하고, 고유의 특성치들 $\{A\}$ 를 갖는다. 예를 들어, 기계와 같은 자원을 나타내는 token은 고장 또는 가공준비 상태를 나타내는 특성치를 갖는다. Transition의 입력 arc는 특정한 token의 흐름 $\{c\}$ 를 정의할 수 있다. Token의 marking은 transition의 firing 시 token이 제거, 생성되는 일반적인 페트리 네트와는 다르게, 특정한 place (token 생성 place, token 제거 place)를 제외하고, 모든 node에서 보존(conservation)된다. 이는 시스템내의 자원이나 물리적 흐름객체를 token으로 표현할 때 함부로 없어지지

나 생성되지 않아야하기 때문이다. 물론 자재를 token으로 표현했을때는 특정한 place에서 생성, 제거 될 수 있다. 이런 페트리 넷에서의 보존 특성을 만족시키기 위하여, 출력 arc에 특정한 token의 흐름을 정의한다. Transition의 입력 arc에는 특정한 transition을 fire 시키도록하는 명세를 정의할 수 있다. 본래의 페트리 넷은 불결정성(nondeterminism)의 특성을 갖고 있다. Token의 marking은 단지 transition enabling과 firing 규칙에 의해 임의로 결정된다. 그러나, 생산시스템과 같이 고도의 조정기능에 의해 운영되는 시스템에서는 불결정성 보다는 결정성의 특성이 필요하다. 즉, 동시에 여러 transition이 firing할 수 있을 때 특정한 transition의 firing을 결정할 필요가 있다. 이러한 결정성의 특성을 위하여 transition의 입력 arc에는 transition firing에 대한 의사결정을 정의할 수 있게 하였다.

2.2 페트리 넷 객체

생산 시스템을 모델링 하기 위한 place와 token 들은 hardware object들을 쉽게 표현할 수 있도록 구분되었다. 크게 workstation과 transportation으로 구분된 place들은 생산시스템의 hardware 성분과 대응되도록 고안되었다(표 1). 각 place들은 시간과 용량외에 필요한 특성치를 갖도록 하였다. Token 객체는 <그림 2>에서 보느냐 와 같이 능동적(active) token 과 수동적 (passive) token 으로 구분된다. 수동적 token은 능동적 token 과의 결합으로 다음 노드로 움직일 수 있는 반면, 능동적 token은 스스로 움직일 수 있다. 능동적 token은 token 조정기능의 명령을 받아 움직이는 controlled token 과 명령을 받지 않는 token 으로 구분된다.

(표 1) 생산시스템의 모델링을 위한 place 객체

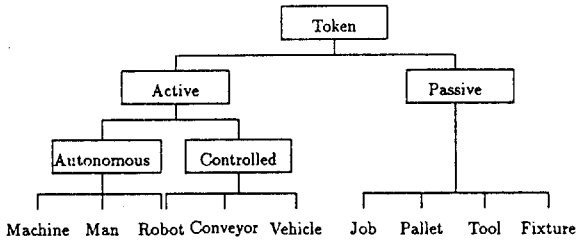
구분	place객체	약칭	place입력 arc의 token 흐름*	특성치
Workstation	Operation	OP	{{(A,J),(A,J,P)}	용량
	Repair	RP	{A}	시간부여형태
	Input buffer	IB	{A,(J,P)}	place고유시간
	Output buffer	OB	{A,(J,P)}	token link방법
	Resource available	RA	{A}	monitoring시점
	Job creation	JC	없음	token조정기능
	Job deletion	JD	{J}	
	General storage	GS	{J,(J,P)}	
	Job storage	JS	{J}	
	Passive token storage	PS	{P}	
Transportation	Control point	CP	{C,(C,J),(C,J,P)}	
	Line	LN	{C,(C,J),(C,J,P)}	
	Transporter available	TA	{C}	
	Pick up	PU	{{(C,J),(C,J,P)}	
	Delivery	DL	{{(C,J),(C,J,P)}	

a : Token class
 A : Autonomous token C: Controlled token
 P : Job token을 제외한 Passive token J: Job token(둘이상의 token class가 합해졌을 때는 ()로 표현)

표 1 에서 보인 place 객체들은 다음의 성격을 갖는다.

1. IB, OB, ST, JS, PS 를 제외한 모든 place들은 최대 하나의 token이 marking될 수있다. 그외의 place들에 대한 용량은 사용자가 설정한다.
2. place에는 세가지 형태의 시간이 정의된다. place 고유의 시간, token이 갖고 있는 시간, 그리고, 고장간 시간 (MTBF) 등이 설정된다.
3. 각 place의 입력 arc에는 특정한 token class가 설정된다.
 - JD, IB, OB, GS, JS, PS 는 수동적 token 만이 허용된다.

- OP, PU, DL 는 능동적 token 과 수동적 token이 결합된 token 만이 허용된다.
 - RA, RP, TA 는 능동적 token 만이 허용된다.
 - LN, CP 는 능동적 token 또는 능동적 token 과 수동적 token이 결합된 token이 허용된다.
4. JC 와 JD 를 제외하고 모든 place, transition에서 token의 흐름은 보존된다. Job token은 JC에서 생성되고, JD에서 제거 된다.



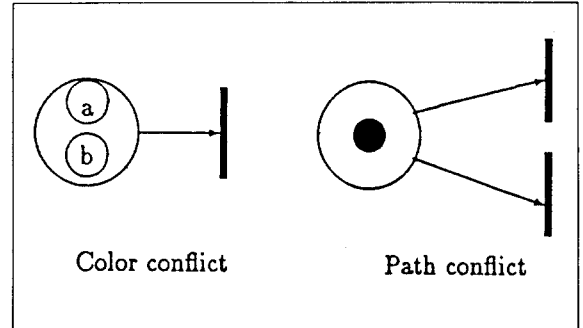
(그림 2) 생산시스템 모델링을 위한 token 객체의 구분

3. 생산시스템에서의 조정기능 과 페트리 넷의 결합

Jones와 McLean[9]에 의해 제안된 자동화 생산시스템의 조정기능은 facility, shop, cell, workstation, equipment 레벨의 계층적 구조로 구성되어 있다. 각 레벨에서는 상위 레벨의 목적 과 과업을 더욱 단순한 과업으로 분해하고, 분해된 과업의 하위 레벨로의 할당, 할당된 과업에 대한 결과 분석 등을 실현한다. 상위 두 레벨에 속한 조정기능들은 공장내의 hardware를 실시간으로 조정하지 않는 off-line 의사결정 시스템이다. 시물레이션 모델상에서는 이들의 의사결정 시스템은 일련의 입력 데이터로 주어질 수 있다. Cell 레벨은 다양한 station 을 통한 job 들의 sequencing 과 관계가 있다. 이들의 기능들은 자원분석, 자원할당, job routing에 대한 의사결정, job의 dispatching, 그리고, 작업 과 station 상태에 대한 감시 등이다. PETSIM 에서는 cell 레벨의 조정기능들을 modeling하고, 평가, 분석하는데에 목적을 두고 개발되었다.

PETSIM에서는 생산 시스템의 hardware object과 하위 레벨의 조정기능은 페트리 넷으로 모델링 된다. 일반적으로 페트리 넷 모델의 실행중 transition firing에 의사결정이 필요하게 되는 두 형태의 conflict인 color와 path conflict이 발생한다[6]. <그림 3>에서 보는 바와 같이 color conflict은 firing될 transition의 한 place에 여러 token이 있을 때 발생한다. Transition을 firing 할 때 여러 token 중 한 token이 선택되어, transition의 출력 place로 옮겨야 한다. Path conflict 은 한 place의 출력 transition이 둘이상 있을 때 발생한다. 그 place가 token을 가지고 있을 때 여러 transition 중 fire될 한 transition을 선택 하여야 한다. 이러한 두가지 형태의 conflict 을 해결하기 위하여 의사결정이 필요하게 되고, 이러한 의사결정은 셀 레벨의 조정기능과

밀접한 관계가 있다.



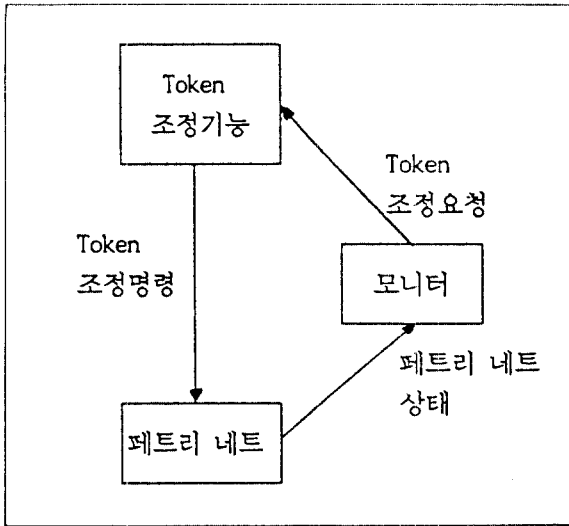
(그림 3) 페트리 넷의 conflict

3.1 Monitoring

셀 수준의 주요 기능은 batch와 material handling equipment의 sequencing, 그리고, 작업, station 의 상태 감시 이다. PETSIM에서 상태 감시는 페트리 넷 모델에서 발생하는 상태정보및 조정요청을 받음으로써 실현된다<그림 4>. 만약 monitoring system 이 페트리 넷에서 조정요청 (control request) 을 받으면, 이 요청을 token 조정 시스템에 보낸다. Token 조정 시스템은 조정요청에 따라 적절한 명령을 페트리 넷 모델에 보냄으로써 넷 내의 conflict을 풀수 있도록 한다. 페트리 넷에서 monitoring system에 정보를 보내는 시점은 (1) token이 place에 도착할 때, (2) token이 place를 떠날 때, (3) token의 상태가 processing 에서 waiting 으로의 변화할 때 등이다. 정보의 내용과 정보 전송시점은 페트리 넷의 place 모델링시 설정된다.

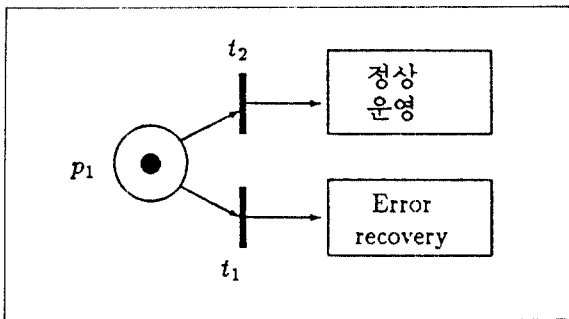
3.2 Error recovery

페트리 넷의 한 place에 있는 기계와 같은 자원 token 이, 할당된 작업(시간지연)을 끝냈을 때, 이 정보는 monitor에 전달 된다. 만약 monitoring system이 토큰의 상태가 고장임을 감지 하였을 때 error recovery의 절차가 필요하게 된다. <그림 5> 에서, place p_1 은 두개의 출력 transition을 갖고 있다. 하나는 작업을 성공적으로 끝냈을 때를 위한 것이고, 다른 하나는 고장이 발생하였을 때를



〈그림 4〉 페트리 넷, 모니터, token 조정기능의 결합

위한 것이다. p_1 에 있는 token이 고장임을 monitoring이 감지 하였을 때, token 조정시스템은 transition t_2 대신에 t_1 을 fire하여 error recovery 절차를 수행하도록 페트리 넷에 명령을 하달한다.

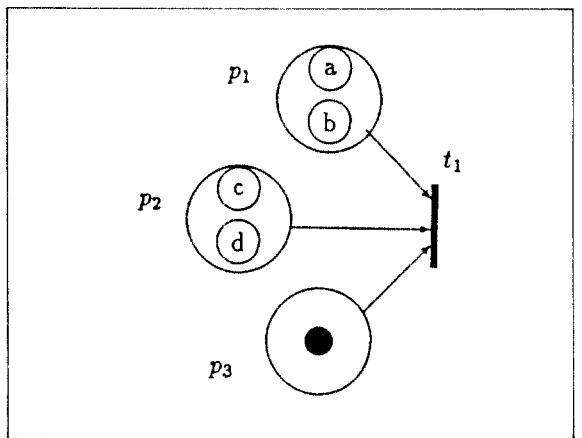


〈그림 5〉 Error recovery의 path conflict

3.3 Job release

loading area에서의 실시간 job release는 PETSIM에서 두 가지 형태의 방법으로 실행된다. 구분된 place 중 JC는 job token을 생성한다. Job token이 생성될 때 작업물의 종류는 scheduling 정책과 pallet, fixture, 기계 등과 같은 자원의 현재 상태를 고려하여 결정된다. JC에서 job token 이

떠날 때 이 정보는 monitoring에 전달 되고, token 조정 시스템은 job release 요청을 받아 새로운 job token의 type을 결정한다. 다른 방법은 페트리 넷상의 path conflict을 해결함으로써 가능하다. 예를 들어, 〈그림 6〉에서와 같이 job release는 두가지 선택을 필요로 한다. p_1 에 있는 job token 중 한 token 과 p_2 에 있는 pallet token 중 한 token을 선택하여야 한다. 이는 능동적 token이 p_3 에 도착 하였을 때 이정보를 monitoring에 보내고, token 조정 시스템은 token 선택 요청을 받아, 적절한 token들이 transition t_1 의 firing에 참여 하도록 한다.



〈그림 6〉 Job release의 color conflict

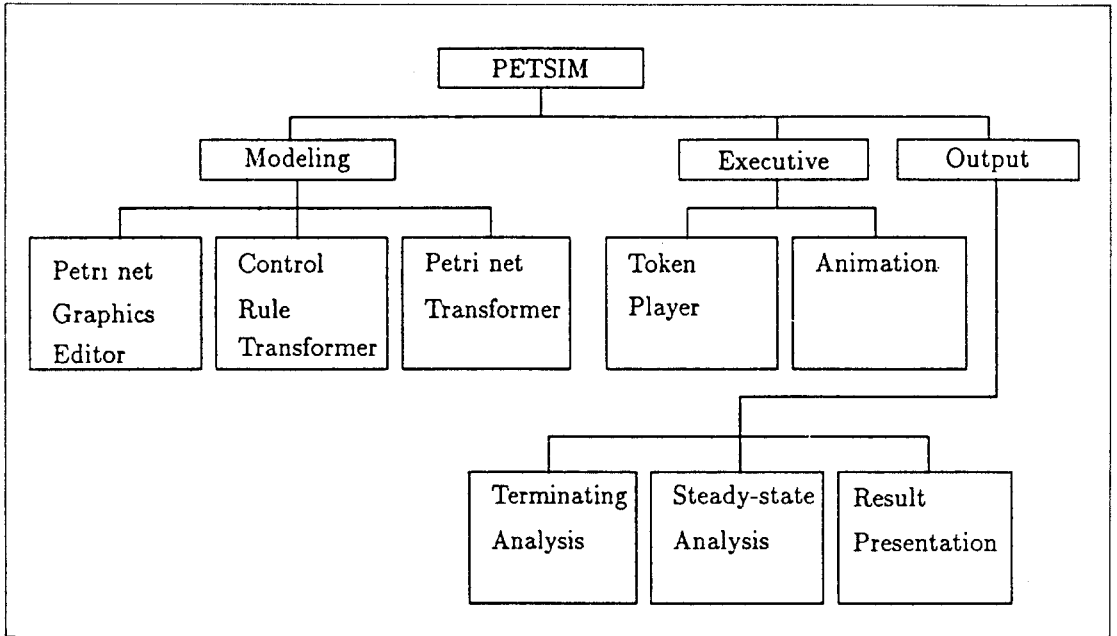
3.4 Dispatching material handling systems

Material handling equipment들이 페트리 넷에서 token 으로 표현 됐을 때 이들은 controllable token이고, 넷에서의 path가 주어져야 한다. 넷에서 이러한 controllable token 들의 흐름을 수행하기 위해 token 조정 시스템은 넷의 현상태를 분석하고, token에 명령을 하달하여 넷의 path conflict을 해결하여야 한다. 예를 들어, TA place 에 있는 AGV token은 waiting 상태일 때 이 정보를 monitoring에 전달한다. Token 조정 시스템은 monitoring으로부터 AGV token control 요청을 받아, AGV token의 다음 작업을 할당하고, token의 path를 결정한다.

4. PETSIM의 구조

개발된 시물레이션 도구는 모델링, 실행부, 결과분석등을 수행하는 하부 시스템들로 구성되어 있다(그림 7).

적으로 표현함으로써 Top-down 모델링을 가능케 한다. 함축 place를 사용하였을 경우, 한 페트리 넷 모델은 계층적인 여러 sub 모델로 구성된다(그림 8). 그래픽 편집기는 arc의 노드간 연결, token 흐름의 보존성등 모델의 잘



(그림 7) PETSIM의 구조

모델링은 페트리 넷과 token 조정기능 모델링을 위한 시스템으로 구성되어있다. 페트리 넷 모델은 그래픽 편집기를 이용하여 손쉽게 작성되고, 이 모델은 페트리 넷 변환기를 통하여 시물레이션 실행을 위한 내부구조로 변환 된다. token 조정기능 모델은 페트리 넷의 token 움직임을 조정, 관리 할 수 있도록 따로 작성되어, 후에 페트리 넷 실행부와 결합된다.

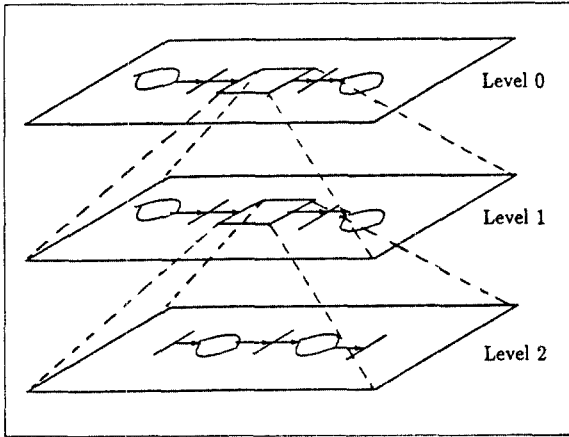
4.1 페트리 넷 그래픽 편집기

페트리 넷 모델은 그래픽 편집기에서 생성, 수정된다. 사용자는 icon 으로 표현된 6 개의 기본성분(place, transition, directed arc, inhibitor arc, token, abstracted place)을 화면의 원하는 곳에 위치할 수 있다. 원 대신 사각형으로 나타내는 함축 place는 세부적인 수준의 모델을 함축

못된 점을 interactive 하게 알려준다. 또한, 기 저장된 페트리 넷 모델은 손쉽게 수정되고, 함축 place의 세부 모델로 대체될 수 있어, 모델의 재사용(reusability)을 가능케 한다. 그래픽 편집기에서 생성된 페트리넷 모형은 페트리넷 변환기를 통하여 토큰플레이어에서 실행될 수 있는 입력 데이터로 재구성된다.

4.2 token 조정기능 모델링

Token 조정기능의 모델은 기정의된 것(predefined routine)과 사용자정의(user defined routine)로 구별된다. 모델링을 돕기 위하여 AGV dispatching, robot dispatching, job release, 기계로의 job loading등의 주요한 control 기능들은 기정의 되어 단지 사용자가 필요한 파라미터 값만 입력하면 되도록 하였다. 그러나, 기정의 된것외의 다른 조정기



〈그림 8〉 압축 place를 사용한 top-down 모델링

능을 필요로할 때는 사용자가 C 프로그래밍언어로 〈그림 9〉에서 보인 monitoring 정보구조를 이용하여 작성하여야 한다. Monitoring 정보는 workstation, place, 그리고, token의 상태로 표현되는 work in process, 기타 자원의 상태등으로 구성되어 있다.

4.3 토큰 플레이어 와 애니메이션

토큰 플레이어(token player)는 페트리 넷 모델을 실행시키며, monitoring과 token 조정기능에 message를 주고받는다. 자세하게는, 시뮬레이션 동안 넷 모델의 token 움직임을 관장하고, 필요한 정보를 monitoring에게 전달한다. 넷상에 conflict이 발생하였을 때는 token 조정기능으로 부터 token 움직임에 관한 명령을 전달 받는다. 넷의 실행은 interactive한 애니메이션을 통하여 볼 수 있다. 애니메이션을 이용하여, 모델의 검증을 쉽게할 수 있는 장점이 있다.

4.4 Output 분석 과 결과

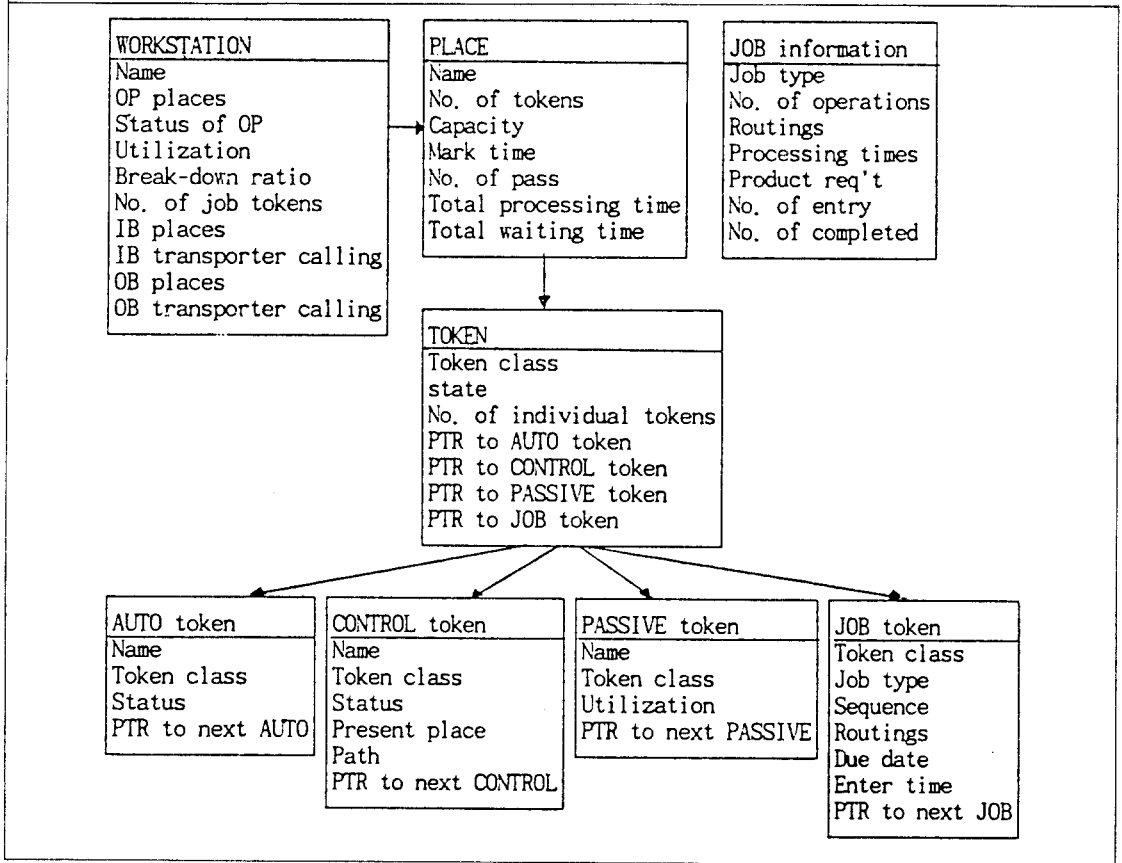
시뮬레이션의 결과데이터로 부터 output analyzer는 시뮬레이션의 성격에 따라 성능 척도에 대한 추정을 수행한다. 즉, finite horizon 또는 steady state 시뮬레이션에 따라 추정방법을 달리 한다. Steady state 추정을 위해 steady state 시점을 구하는 절차, batch mean에 의한 추정등을 포함한다. 결과는 생산시스템의 주요한 척도인 throughput rate,

flow time, work in process, make span를 포함하고, 페트리 넷의 place 와 token에 대한 통계치를 이용하여 필요한 결과를 얻을 수 있다.

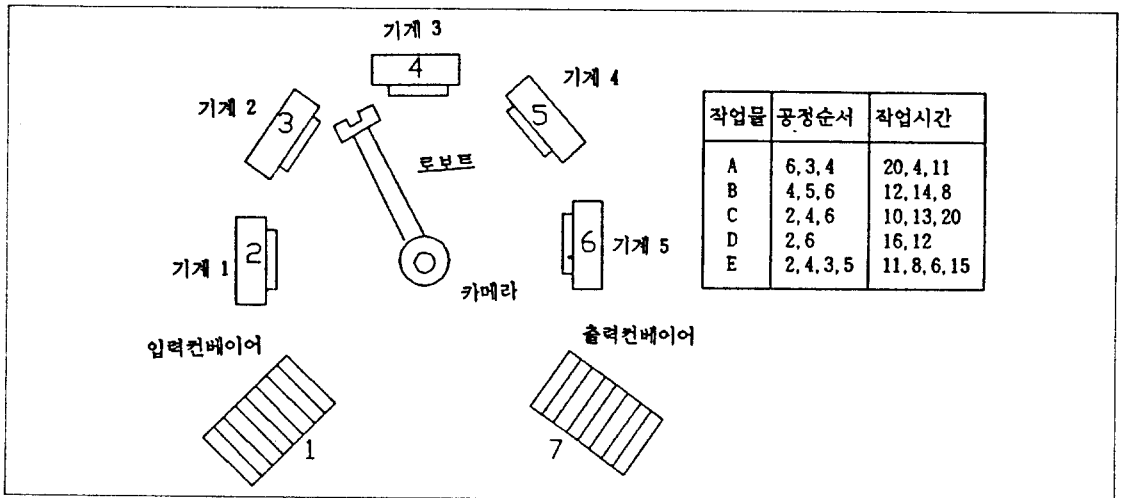
5. PETSIM의 이용 예

개발된 PETSIM을 이용한 모델링 과 결과분석의 예를 제시한다. 본 예에서 고려한 생산시스템은 로봇이 작업물을 움직이는 유연제조셀(FMC)로서 참고문헌 [1]에서 설명된 것이다. 〈그림 10〉은 FMC의 구성과 가공되는 작업물의 종류, 공정순서를 보여준다. 이 FMC는 원 모양으로 배치된 5 대의 기계, 하나의 입력컨베이어, 하나의 출력컨베이어, 그리고, 중앙에 위치한 로봇으로 구성되어 있다. 각 기계들은 앞공정으로 부터 도착된 재공품을 일시 저장할 수 있는 공간이 있다. 즉, 회전작업대를 이용하여 최대 두개의 작업물을 동시에 보유하도록 한다. 로봇 팔은 셀컨트롤러에 의해 입력컨베이어 나 기계의 작업대까지 이동하여 그리퍼로 작업물을 집고, 다음 가공을 위한 기계 또는 출력컨베이어의 지정된 위치에 작업물을 놓는다. 다음 위치로 이동할 작업물의 이동은 다음 위치에 저장공간이 확보 되었을 때만 가능하다. 셀컨트롤러는 여러 센서를 이용한 시스템의 정보를 받는다. 즉, 입력컨베이어의 작업물, 각 기계의 회전작업대에 있는 작업물의 정보 및 로봇팔의 현재 위치, 현재 상태등에 대한 정보를 받아 로봇의 이동을 지시한다.

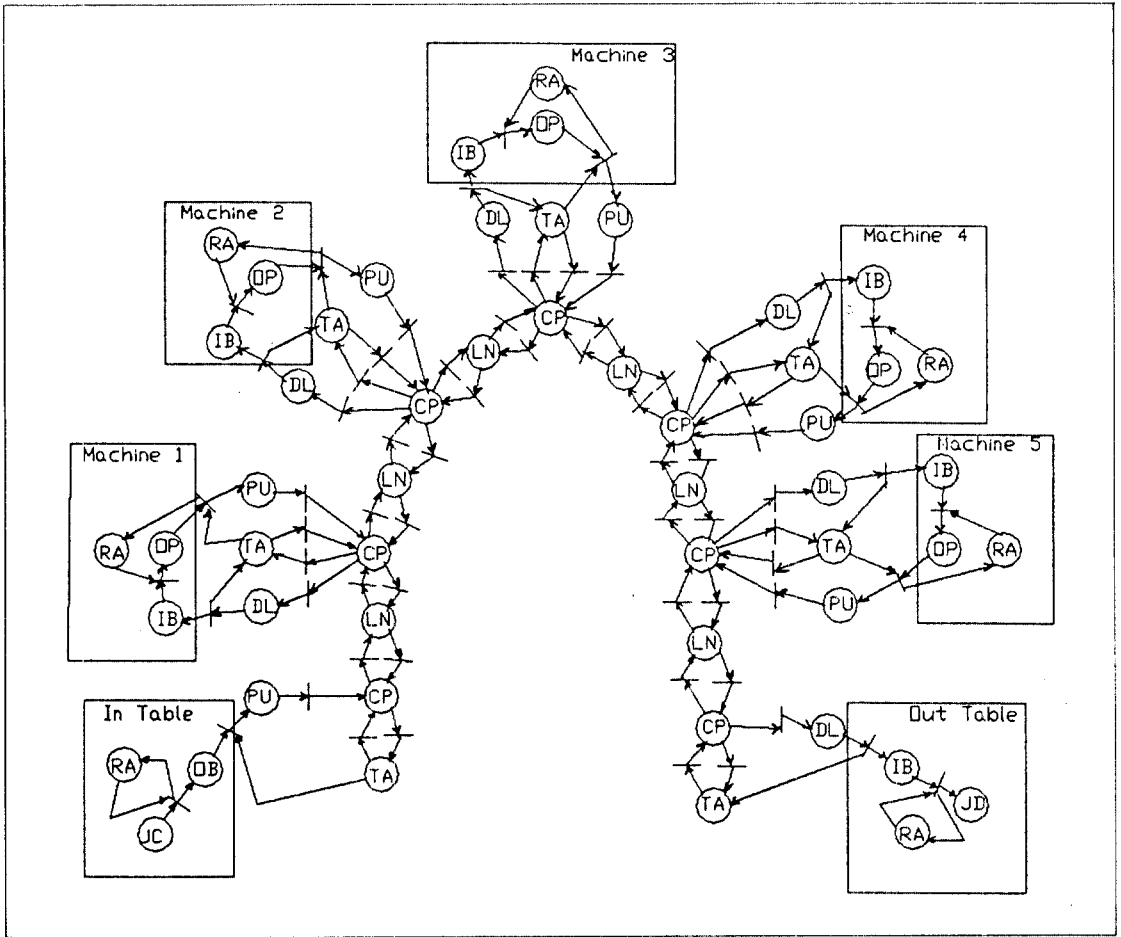
PETSIM을 이용한 모델에서, 로봇 팔의 이동을 지시하는 셀컨트롤러의 기능은 token 조정기능으로 실현하고, 그외의 기계, 입출력 컨베이어, 회전작업대의 회전, 이동 지시를 받은 로봇의 세부적인 이동등은 페트리 넷으로 실현한다. 〈그림 11〉은 PETSIM을 이용하여 작성한 페트리 모델을 보여준다. 초기 토큰의 marking은 각 기계의 RA place에 한 machine token이 waiting state로 대기하고 있고, 입출력 컨베이어의 RA place에도 컨베이어 token이 각각 waiting state로 대기하고 있다고 가정한다. 로봇 token은 waiting 상태로 입력 컨베이어의 앞 CP place에 위치하고 있다고 가정한다. JC place에서는 Job token(작업물)을 생성한다. 참고 문헌 [1]에서는 작업물의 도착이 평균 4.0 단위시간 지수분포를 따른다고 가정했으나, 본 실험에서는 외부에서 연속적으로 작업물이 도착한다고 가정한다. 이는 로봇 이동 정책을 평가하기 위한 실험으로 작업물



〈그림 9〉 Monitoring 정보의 구조



〈그림 10〉 로봇 중심의 FMC



〈그림 11〉 FMC의 페트리 넷 모델

의 도착 형태가 이동정책에 미치는 영향을 최소화 하기 위함이다. 그러므로 JC place에서는 한 job token이 떠날때마다 새로운 job token을 생성하며, 작업물의 종류는 랜덤 하게 생기게 하였다. 로봇의 이동 정책은 참고문헌 [1]에서 우수하다고 판단된 최대공정우선규칙(MXRN)을 사용 하였으며, 이는 시스템내의 작업물에 대한 monitoring 정보를 이용하여 모델링 하였다.

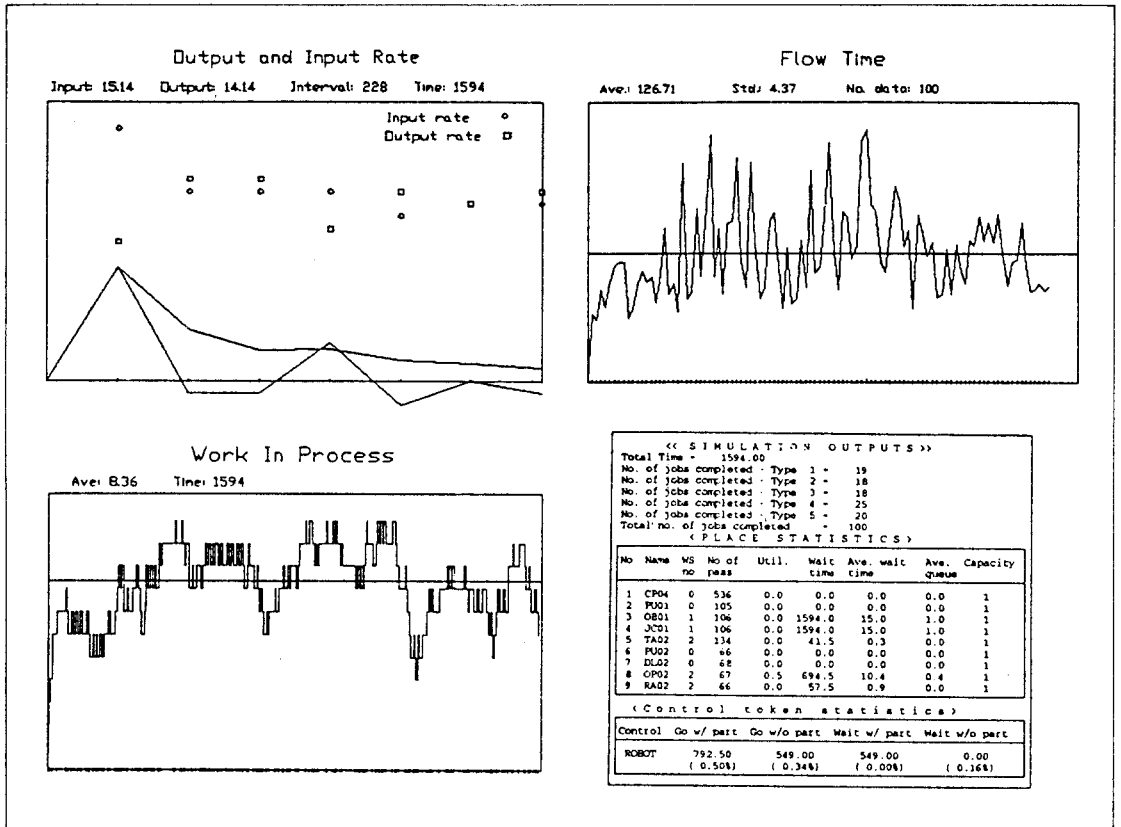
위의 FMC 모델을 시뮬레이션하는 도중 어느 작업물도 이동할 수 없는 상태인 deadlock 상태가 발생 하였다. 기계 2에 있는 작업물은 기계 3으로, 기계 3에 있는 작업물은 기계 5로, 기계 5에 있는 작업물은 다시 기계 3으로 이동하여야 하나 이 세 기계에는 새로운 작업물을

위한 공간이 확보되어있지 않는 환형대기상태(circular wait state[3])가 발생된 것이다. 즉, 어느 작업물도 이동될 수 없는 deadlock 상태가 발생된 것이다. 이를 해결하기 위하여는 여분의 일시 저장장소를 확보하여 deadlock 상태에 있는 작업물을 일시 옮기는 방안과 로봇 이동정책에서 deadlock을 발생시키지 않도록 고려하는 방안이 있다. 본 실험에서는 후자를 채택하여 실험을 하였다. 고려한 방안을 간략히 설명하면 다음과 같다. 로봇이 옮길 작업물을 선택할 때 어느 작업물의 이동이 환형대기상태를 유발할 가능성이 있는지를 검토한다. 이를 위하여, 작업물들이 있을 수 있는 공간 자원(즉, 버퍼, 기계등)을 노드로 표현하고, 작업물들의 다음 위치(작업물의 routing)를 arc

로 표현한 그래프를 생성한다. 이 그래프에서, 이동을 고려하고 있는 작업물이 이동을 했다고 가정하고, 각 node 에 있는 작업물의 갯수를 추가하여 marked 그래프를 완성한다. 이러한 그래프에서, 각 노드에 있을 수 있는 작업물의 수 (capacity) 와 현 작업물의 수를 고려하여, 미래의 deadlock 가능성, 또는 현재의 deadlock 을 조사한다. 이 방안에 대한 자세한 설명은 본논문의 범위를 벗어나므로 여기서는 언급을 피한다. 결론적으로, Deadlock을 고려한 상기 정책을 로봇 이동 정책에 반영하여 실험한 결과 deadlock 현상은 보이지 않았다. PETSIM에서 제공한 시물레이션 결과의 일부는 <그림 12>와 같다.

6. 결론 및 향후 연구

컴퓨터 통합생산 시스템 또는 자동화 생산 시스템의 설계 및 분석을 수행하기 위한 도구 중 시물레이션은 우수한 기법으로 인정 되어 왔다. 그러나 많은 시물레이션 도구들은 사용자들이 이용 하기에 어려운 점이 존재한다. 특히 생산시스템의 모델링과 결과 분석은 시물레이션 project 의 bottleneck으로 인식된다. 본 연구에서는 이러한 어려움을 극복하기 위하여 페트리 넷에 기초한 시물레이션 도구를 개발하였다. PETSIM은 궁극적으로, 시물레이션을 수행하는데 있어서 computer-aided environment를 제공하는



<그림 12> 시물레이션 결과

데 있으며, 그중 일부 연구된 결과를 소개 하였다. 현재 진행중인 연구로는 object-oriented programming 기법의 도

입, 생성된 모델의 data base 화, token 조정기능을 모델링하기 위한 language 개발, 그리고 사용자의 요구에 따른 모델의 자동 생성 등이 있으며, 이들은 향후 PETSIM에 첨가될 예정이다.

[참고문헌]

- [1] 박 양병, "로봇 중심 FMC에서 최적 로봇 서비스 이동정책을 위한 연구", 「한국시물레이션학회 논문집」, 1권, 1호, (1993), pp. 55-63.
- [2] Alanche, P., Benzakour, K., Dolle, F., Gillet, P., Rodrigues, P. and Vallet, R., "PSI: A Petri Net Based Simulator for Flexible Manufacturing Systems", *Lecture Notes in Computer Science* 188, (1984), pp. 1-13.
- [3] Banaszak, Z. A. and Krogh, B. H., "Deadlock Avoidance in Flexible Manufacturing Systems with Concurrent Competing Process Flows", *IEEE Transactions on Robotics and Automation*, Vol. 6, No. 6, (1991), pp. 724-734.
- [4] Beck, C. L. and Krogh, B. H., "Models for Simulation and Discrete Control of Manufacturing Systems", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1986), pp. 305-310.
- [5] Bruno, G. and Morsio, M., "Petri Net Based Simulation of Manufacturing Cells", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1987), pp. 1174-1179.
- [6] Camurri, A. and Frixione, M., "Structured Representation of FMS Integrating SI-NETS and High Level Petri Nets", *Applied Artificial Intelligence*, Vol.4, (1990), pp. 109-131.
- [7] Gentina, J. C. and Corbeel, D., "Coloured Adaptive Structured Petri Nets: A Tool for the Automatic Synthesis of Hierarchical Control of Flexible Manufacturing Systems", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1987), pp. 1166-1173.
- [8] Jockonic, M., Vukobratovic, M. and Ognjanovic, Z., "An Approach to the Modeling of the Highest Control Level of Flexible Manufacturing Cell", *Robotica*, Vol.8, (1990), pp. 125-130.
- [9] Jones, A. T. and McLean, C. R., "A Proposed Hierarchical Control Models for Automated Manufacturing Systems", *Journal of Manufacturing Systems*, Vol.5, No.1, (1986), pp. 15-25.
- [10] Kodate, H., Fujii K., and Yamanoi, K., "Representation of FMS with Petri Net Graph and its Application to Simulation of System Operation", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, Vol.3, No.3, (1987), pp. 275-283.
- [11] Kumar, D., "An Approach Towards Distributed Simulation of Timed Petri Nets", *Proceedings of the 1990 Winter Simulation Conference*, (1990), pp. 428-435.
- [12] Martinez, J., Muro, P. and Silva, M., "Modeling, Validation and Software Implementations of Production Systems Using High Level Petri Nets", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1987), pp. 1180-1185.
- [13] Narahari, Y. and Viswanadham, N., "A Petri Net Approach to the Modeling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems", *Annals of Operations Research*, Vol.3, (1985), pp. 449-472.
- [14] Peterson, J. L., *Petri Net Theory and the Modeling of Systems*, Englewood Cliffs, NJ:Prentice Hall, 1981.
- [15] Torn, A. A., "Simulation Nets, A Simulation Modeling and Validation Tool", *Simulation*, Vol.45, No.2, (1985), pp. 71-75.
- [16] Valette, R., "Nets in Production Systems", *Lecture Notes in Computer Science* 255, (1987), pp. 191-217.
- [17] Zhou, M. and Dicesare, F., "A Petri Net Design Method for Automated Manufacturing Systems with Shared Resources", *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, (1990), pp. 526-531.

● 저자소개 ●

**임동순**

저자(임동순)는 현재 한남대학교 산업공학과 조교수로 재직중이다. 한양대학교에서 학사, 한국과학기술원에서 석사, 아이오와 주립대학에서 박사 학위를 취득하였다. 주요 관심분야로는 생산제조시스템의 분석 및 시물레이션이다.