

페트리 넷를 이용한 자동화 조립 시스템의 분석

최준열, 안인석, 이노성, 장석호, 박승규, 우광방
연세대학교 전기공학과

An Analysis of Automatic Assembly System using Petri Nets

Joonyoul Choi, Ihnseok Ahn, Nohsung Lee, Sukho Jang, Seongkyu Park, Kwangbang Woo
Department of Electrical Engineering, Yonsei University

ABSTRACT

Automatic Assembly Systems(AAS) are a class of systems exhibiting concurrency, asynchronicity and distributedness, and can be modeled by Petri Nets. In this paper, we design two types of configuration of part-assembly system in the car manufacturing line, as an example of AAS. And, we make a modeling the system by utilizing Extended Petri Nets, simulation as varying machine parameters, and analysis of operation status. These enable to present the information of optimal status and various problems occurring in the system for achieving high production rate.

1. 서론

자동화된 조립시스템은 로봇트, 컨베이어, 비전 등의 할당된 재원을 이용한 일련의 조립공정을 통해 제품을 생산하는 생산시스템으로서 수작업을 대체하여 인력경비와 작업위험을 줄이고 생산능률을 극대화시키는 것이 그 목표이다.

따라서, 원하는 제품을 효율적으로 생산하기 위하여 재원을 적절히 배치하고 동기화하는 것이 필요하며, 이를 위한 방안으로 각 기계의 작업능력을 평가하여 최적의 작업상태를 도출하는 시뮬레이션 기법이 필요하다. 확장된 페트리 넷(Extended Petri Nets)는 시스템을 계층적으로 모델화하므로 설계 및 합성이 용이하며, 복잡한 시스템을 쉽게 시각화할 수 있는 도구로서 DEDS(Discrete Event Dynamic System)를 평가하는데 유용하다[1]-[4].

본 연구에서는 성능분석을 위한 자동조립시스템의 예로써 자동차 생산라인에서의 부품 자동 장착 시스템을 두 가지 형태로 설계하고 확장된 페트리 넷를 이용, 공정을 모델링하고 시뮬레이션하여 비교한다. 이를 통해 제한된 재원을 사용하여 최대한의 생산성을 이루기 위한 정보를 제시한다.

다음의 2장에서는 DEDS 모델의 기술에 적합한 확장된 페트리 넷에 대한 이론을 소개하고, 3장에서는 대상시스템인 자동 장착 시스템을 설계하고 모델링한다. 그리고 4장에서는 시스템 분석을 위한 시뮬레이션 및 결과고찰을 한 후, 5장에 결론을 제시한다.

2. 조립시스템 모델링을 위한 페트리 넷

이 장에서는 페트리 넷의 가장 기본적인 내용과 본 논문에서 이용한 확장이론을 소개한다[5]-[9].

2.1 페트리 넷 정의 및 성질

1) 구성요소

마킹(Marked) 페트리 넷는 다음 네개의 구성요소로 이루어진 방향성 그래프이다.

$$PN = \{ P, T, A, M_0 \} \quad (1)$$

P : 플레이스의 집합 $P = \{p_1, p_2, p_3, \dots, p_n\}$

T : 트랜지션의 집합 $T = \{t_1, t_2, t_3, \dots, t_m\}$

A : 입/출력 아크(arc)들의 집합

$$A \subseteq (P \times T) \cup (T \times P)$$

M_0 : 페트리 넷의 초기마킹(marking)

$$P \rightarrow \{0, 1, 2, \dots\}$$

플레이스는 트랜지션이 일어나기 위한 조건과 시스템의 한 상태를 나타내고 트랜지션은 수행되는 동작이나 상태를 변화시키는 사건을 나타낸다. 이들은 서로 방향성을 가진 아크로 연결되며 마킹되는 토큰(token)을 통해 현재 상태의 제어정보를 표시한다.

2) 마킹

초기마킹 M_0 이후의 마킹 M은 토큰의 배치를 나타내는 벡터로 다음과 같이 정의한다.

$$M = \{m_1, m_2, m_3, \dots, m_n\}^t \quad (2)$$

여기서, n 은 플레이스의 갯수이고 m_i 는 플레이스 p_i 내에 존재하는 토큰의 갯수 N 이다.

3) 활성화(enable)

각 입력 플레이스가 적어도 트랜지션으로 향하는 아크 수 만큼의 토큰들을 가지고 있을 때 활성화된다고 정의한다. 즉,

$$Vp \in \cdot t, M_s(p) \geq A(p, t) \quad (3)$$

여기서, $\cdot t$ 는 트랜지션을 위한 입력 플레이스의 집합이다.

4) 점화(fire)

활성화된 트랜지션은 아크로 연결된 각 입력 플레이스의 토큰을 제거하고 출력 플레이스들로 연결된 아크 수 만큼의 토큰을 내보내는데 이를 점화라 한다. 즉,

$$Vp \in \cdot t, M_s'(p) = M_s(p) - A(p, t) \quad (4)$$

$$Vp \in \cdot t, M_s'(p) = M_s(p) + A(t, p)$$

여기서, s' 는 현재상태 s 의 다음상태를 나타낸다.

2.2 확장된 페트리 넷트

기본적인 페트리 넷트로는 실제시스템의 상태변화와 제어흐름을 정확하게 표현하기 힘들고, 복잡한 시스템일 경우 플레이스와 트랜지션의 수가 급격하게 증가하므로 시각적 표시와 이해가 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 많은 확장과 수정(modification)이 연구되었다[6]-[9].

1) 플레이스의 기능적 구분

토큰의 생성과 소멸, 모듈식 넷트 구성 등의 역할에 따라 몇가지 형태의 플레이스로 구분한다.

2) 토큰의 추가

제어, 정보, 자원, 그리고 부품의 흐름을 동시에 나타내기 위해 여러 종류의 토큰을 추가한다.

3) 금지 아크의 도입

특정 트랜지션에 점화가 일어나지 않게 하는 아크로서, 충돌회피나 고장 넷트에 사용된다.

4) 시간 트랜지션(timed transition)

기본적 페트리 넷트 구조는 시간 개념을 가지고 있지 않

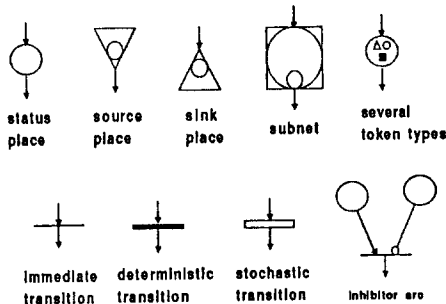


그림 1. 확장된 페트리 넷트 기호

다. 그러나, 생산시스템의 모델링에서는 시간의 추적(tracking)이 필수적이다. 따라서, 플레이스나 트랜지션에 시간적 특성을 부여하는 연구가 진행되고 있다. 여기서는, 시간 트랜지션을 도입한다. 이러한 시간 트랜지션은 점화하는 시간간격 특성에 따라 즉각(immediate) 트랜지션, 고정시간(deterministic) 트랜지션, 확률분포적(stochastic) 트랜지션이 있다. 그림 1은 확장된 페트리 넷트의 기호들이다.

3. 시스템 설정 및 모델링

본 장에서는 자동화 조립시스템의 예로써 자동차 생산라인에서의 A 부품 자동 장착 시스템을 구성하고 모델링한다.

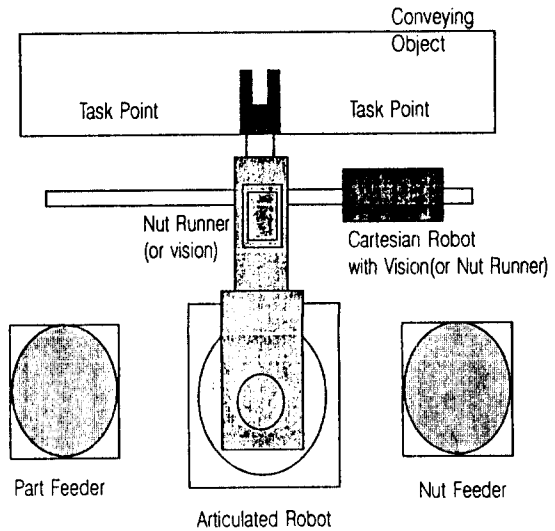


그림 2. 자동 장착 시스템

3.1 시스템 설정

A 부품 자동 장착 시스템은 장착용 로봇, 비전 시스템, 자동 너트 체결기, 직교 로봇, A 부품 공급장치, 너트 공급 장치, 그리고 공정간 이송장치 등으로 구성된다. 그림 2는 전체 시스템의 기본 구조를 보여준다. 이송장치를 통해 대상물이 작업영역 내에 들어오면 비전 시스템이 장착에 필요한 위치와 형태를 인식하고 이들 정보를 로봇과 너트 체결기에 전송한다. 전송된 정보에 따라 로봇은 공급장치에서 장착물인 A 부품을 집어서 작업위치로 이동하여 삽입하고 너트 체결기가 동시에 내 군데의 너트를 체결한다. 각 기계들은 고장이 발생할 수 있으며, 수리시간 동안 전체 작업이 지연된다. 공급 장치에서의 부품공급은 계속적으로 이루어진다고 가정하고, 이 작업은 병렬적으로 처리되어 전체 작업시간에 영향을 주지 않는다.

이 시스템의 경우 각 장치의 효율적인 배치와 추가, 작업

시간, 그리고 최적 스케줄링을 통해 여러가지 형태의 LAYOUT 이 구성될 수 있다. 본 연구에서는 A 부품 장착용 로봇에 장착되는 장치에 따라 시스템을 두 가지 형태로 구성하였다.

- 1) 형태 I: 로봇에 비전 시스템을 장착하는 경우
 - A 부품 장착용 로봇에 비전 시스템을 함께 장착하여 작업위치 인식을 위한 비전 시스템이 이 로봇트를 이용해 이동되고, 자동너트 체결기는 직교 로봇트에 장착되어 이동된다. 이 경우, A 부품 삽입 후 가체결이 이루어져야 한다.
- 2) 형태 II: 로봇에 너트 체결 장치를 장착하는 경우
 - 너트 체결기가 장착용 로봇트와 같이 이동하며, 비전 시스템은 독립되어 직교 로봇트에 의해 움직인다. 이 경우, 너트 체결 시 토오크가 로봇트에 전달될 수 있다.

에 대한 페트리 넷트이다.

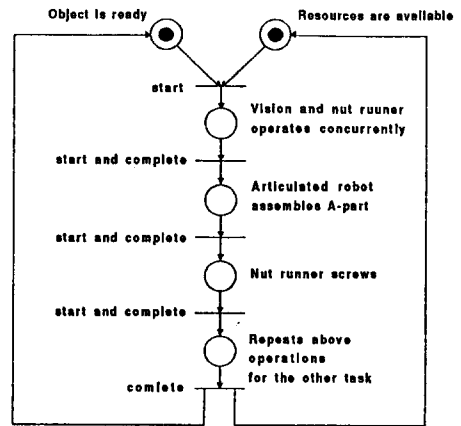


그림 3. 단계 1의 전체 페트리 넷트(형태 I)

3.2 대상 시스템 모델링

각 형태의 시스템에 대한 페트리 넷트 모델링을 위해 다음의 단계적 넷트 구성 알고리즘을 이용한다[10].

- 단계 1: 모든 주요한 재원이 사용가능한 상태에서 시스템이 동작하는 것을 나타내며 안전성(safeness), 활동성(liveness), 가역성(reversibility)을 가진 페트리 넷트를 선택한다.
- 단계 2: 단계 1에서 구성된 시스템을 동작 플레이스들로 표현되는 몇 개의 서브 시스템으로 분해한다. 각 동작 플레이스를 더 이상 분해할 필요가 없을 때까지 자세하게 구분하여 기본 모델들로 대체한다. 분해 전, 재원이 필요한 동작이 있을 때 적절한 재원 플레이스를 추가한다.
- 단계 3: 연결을 위해 일시적(temporary)으로 추가된 플레이스를 제거한다.
- 단계 4: 안전성, 활동성, 가역성을 만족하는 페트리 넷트 모델을 얻는다.

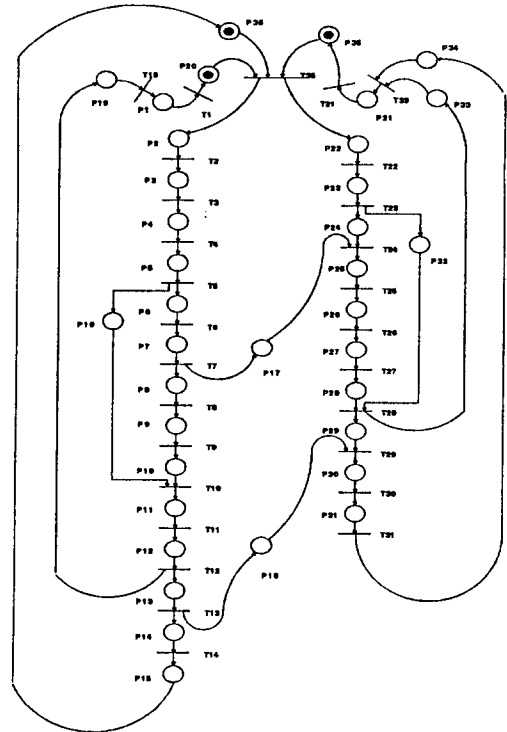


그림 4. 단계 4의 페트리 넷트(형태 I)

위 단계들을 통해 얻어진 페트리 넷트는 기본 구성요소들 로만 이루어진다. 여기에 2.2절의 확장성을 부여하여 완전한 페트리 넷트 모델링을 이룬다.

그림 3은 위의 단계적 넷트 구성 알고리즘의 1단계로서 형태 I 전체 시스템의 주요 동작만을 개략적으로 나타낸다. 여기서는 전체적인 동작 순서가 결정되며, 단계 2,3에서 주요 동작을 세분화하고 재원의 상태를 나타내는 플레이스와 고장 넷트를 추가하여 그림 4의 완전한 페트리 넷트를 구성한다. 표 1은 이 넷트에 쓰인 플레이스에 대한 간략한 설명이고 그림 5는 같은 과정을 거쳐서 구성된 형태 II의 시스템

그림 6은 그림 4와 그림 5에서의 기본적인 구성요소에 의한 페트리 넷트 구조에 확장된 페트리 넷트의 개념을 첨가한 형태 I의 확장 페트리 넷트 구조이다. 즉, 서브넷트로서 전체 동작 흐름을 파악할 수 있는 범위 내에서 세분화된 동작

표 1. 플레이스 설명(형태 I)

플레이스:	상태내용	플레이스:	상태내용
P1:	AR 작업위치 1로 이동	P19:	PF 부품 2 정렬
P2:	VS 작업대상 1 인식	P20:	AR ready
P3:	AR 부품공급기로 이동	P21:	NR(CR) 너트공급기로 이동
P4:	AR(tool) 부품 grasp	P22:	NR 너트 grasp
P5:	AR 작업위치 1로 이동	P23:	NR(CR) 원점으로 이동
P6:	AR(tool) 부품 삽입	P24:	NR(CR) 작업위치 1로 이동
P7:	AR(tool) 부품 가조립	P25:	NR 너트 screwing
P8:	AR 작업위치 2로 이동	P26:	NR(CR) 너트공급기로 이동
P9:	AR 작업대상 2 인식	P27:	NR 너트 grasp
P10:	AR 부품공급기로 이동	P28:	NR(CR) 원점으로 이동
P11:	AR(tool) 부품 grasp	P29:	NR(CR) 작업위치 2로 이동
P12:	AR 작업위치 2로 이동	P30:	NR 너트 screwing
P13:	AR(tool) 부품 삽입	P31:	NR(CR) 원점으로 이동
P14:	AR(tool) 부품 가조립	P32:	NF 너트 정렬
P15:	AR 원점으로 이동	P33:	NF 너트 정렬
P16:	PF 부품 1 정렬	P34:	순서 정상
P17:	충돌 회피	P35:	NR ready
P18:	충돌 회피	P36:	Object ready

AR: Articulated Robot, CR: Cartesian Robot
 VS: Vision System, NR: Nut Runner
 PF: Part Feeder, NF: Nut Feeder

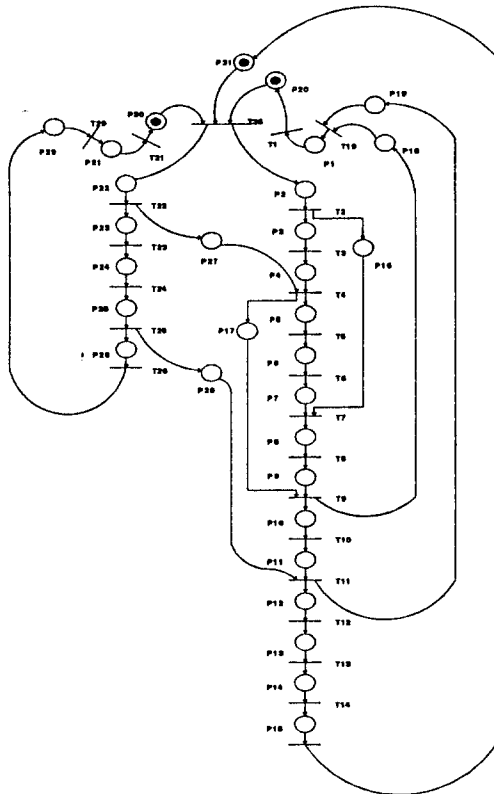


그림 5. 단계 4의 페트리 넷트(형태 II)

표 2. 토큰의 종류

토큰종류	내용
상태(s)	원래의 상태 토큰
재원(r)	재원 사용가능 토큰
비전정보(i)	비전에서 전송되는 정보
제어정보(c)	충돌회피 및 작업순서 제어 토큰
작업대상물(o)	작업영역 내 조립대상

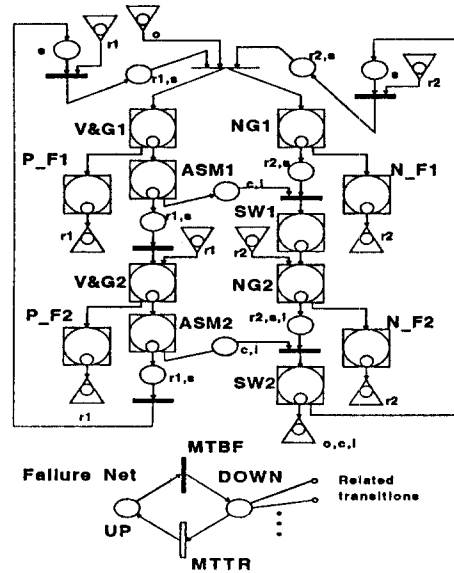


그림 6. 전체 확장 페트리 넷트(형태 I)

을 묶어서 나타낸다. 필요시에는 서브넷트의 구성넷트도 제공된다. 또한, 복수의 토큰을 사용하여 원래의 상태 정보 이외의 제어정보와 부분품, 재원 등을 나타내고 소스스 플레이스와 싱크 플레이스로 이들 토큰의 제공과 소멸을 표시하여 넷트를 명료하게 한다. 복수 토큰의 설명은 표 2에 보여진다. 금지 아크를 이용하여 동작의존 고장으로 모델링한 고장 넷트도 추가하여 시스템을 보다 정확하게 표현한다.

4. 조립시스템의 시뮬레이션 및 성능분석

본 장에서는 3장에서 모델링된 결과를 바탕으로 시뮬레이션 전용 언어인 SLAMII[11]를 이용하여 이산사건 시뮬레이션을 통해 시스템의 성능을 평가하고 제반운용문제에 대한 정보를 제시한다.

4.1 성능분석을 위한 시뮬레이션

본 시뮬레이션의 목적은 실제 시스템의 설치 이전에 제안된 시스템의 성능을 평가함으로써 각 기계의 성능선택과 비용, 구성 장치의 추가 여부 등의 결정을 위한 정보를 얻고자 하는데 있다. 구성된 시스템 형태 1, 2 각각에 대한 성능 평가지표로는 전체 생산효율, 각 기계의 가동율, 구성기계의 성능 변화에 따른 총생산량의 변화, MTBF(Mean Time Between Failure), MTTR(Mean Time To Repair)의 변화에 따른 총생산량의 변화 등이다. 각 결과값들은 초기 과도 상태를 제거한 후 100,000 시간단위로 5회 시뮬레이션한 평균값이며 이들은 표 3과 그림 7-그림 10에 보여진다. 그림 10은 다른 고장값들은 표 4에 나타난 기준값으로 두고 가장 중요한 제한인 장착용 로봇의 고장값을 변화시켜서 얻은 결과이다.

표 3. 생산효율

형태	형태 I	형태 II
총 생산량	1942 개	2334 개
T/T	51.48 sec/개	42.84 sec/개
생산효율	0.019	0.023

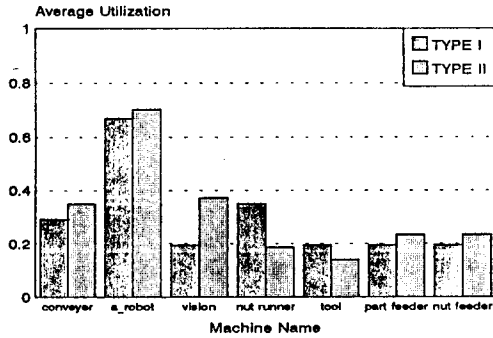


그림 7. 각 기계의 가동율

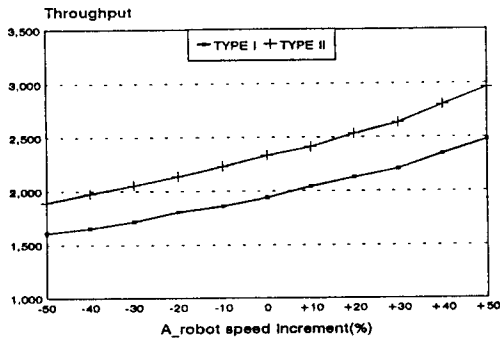


그림 8. 장착용 로봇 속도에 따른 총생산량의 변화

표 4. 시뮬레이션에 사용한 고장값

	MTBF(sec)	MTTR(sec)
장착용로봇	1935	정규분포 N(24, 1)
비전 시스템	745	정규분포 N(16, 1)
너트 체결기	1317	정규분포 N(20, 1)

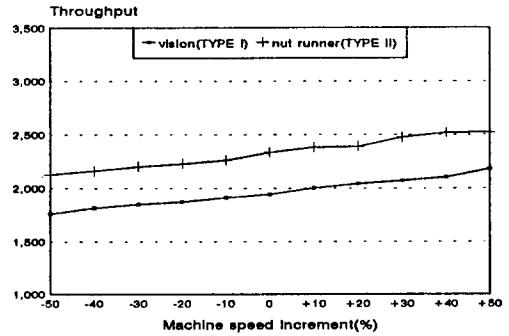


그림 9. 장착 기계 속도에 따른 총생산량의 변화

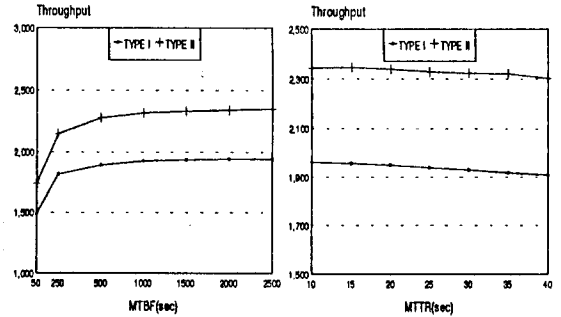


그림 10. MTBF, MTTR의 변화에 의한 총 생산량의 변화

4.2 결과고찰

1) 생산효율

생산효율은 주어진 시간 내에 작업완료된 생산량이다. 이것은 설계된 시스템이 기대치를 만족할 수 있는가를 결정하는 중요한 성능분석 값이다. 표 3에서 나타난 바와 같이 구성된 시스템 형태 2가 형태 1보다 높은 생산효율을 가짐을 알 수 있다. 이것은 장착용 로봇에 비전 시스템을 부착하였을 때 상대적으로 너트 체결기보다 큰 작동시간을 요구하기 때문에 비례적으로 작업시간의 증가를 초래한다. 따라서, 형태 2처럼 작업시간이 큰 비전 시스템을 병렬적으로 독립시켰을 때 전체 작업시간의 감소효과를 기대할 수 있다.

2) 각 기계의 가동율

각 기계의 가동율은 총 가동시간 중 실제작업을 하는데 소요된 시간의 비로써 구해지며 이 때 가동시간에서는 고장 상태시간과 유휴(idle)상태시간은 제외된다. 이를 통해 각 기계의 전체 시스템에의 기여도를 알 수 있다. 그림 7에서 보면 효율 면에서 형태 1의 비전과 형태 2의 너트체결기가 비교대상이 됨을 알 수 있다.

3) 각 기계의 성능변화에 따른 총생산량의 변화

그림 8과 그림 9는 작업을 처리하는 각 기계의 속도를 변화시켰을 때 총생산량의 변화폭을 나타내고 있다. 여기서 장착용 로봇트에 속도에 의한 생산량 증가 폭이 상대적으로 크다는 것을 알 수 있다. 따라서, 생산량과 비용한계가 정해지면 이에 부합하는 성능을 가진 각 기계선택을 위한 정보가 된다.

4) MTBF와 MTTR의 변화에 따른 총생산량의 변화

그림 10은 다른 에서 보면 구성된 시스템에서는 MTBF가 1000 이상이 되면 전체 효율에 미치는 영향이 극히 작다는 것을 알 수 있다. 또한, MTTR의 변화는 그만큼의 작업시간 증가 효과를 가진다고 할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 생산라인의 자동 조립 시스템을 구성하고 페트리 넷을 이용하여 모델링하고 시뮬레이션하였다. 모델링은 먼저 기본 페트리 넷의 Top-Down 접근을 통한 합성(synthesis) 방법으로 이루어졌으며, 다음으로 확장된 페트리 넷 요소를 사용하여, 보다 간편하고 정확하게 시스템 상태를 표현할 수 있었다. 실제 시스템 설치 전에 위와 같이 시뮬레이션을 통해 목표에 부합하는 생산효율, 재원의 성능 등을 평가함으로써 최적구성과 운용에 관한 제반 정보를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

추후과제는 각 구성요소의 비용과 성능등을 고려한, 자원 추가여부에 관한 기대값을 계산하여 시스템 구성의 변화를 시도함으로써 시스템의 유연성을 확보하는 것이다.

6. 참고문헌

- [1] Chengche Feng and Alan A. Desrochers, "Sensitivity Analysis of a FMS by a Petri Net based Perturbation", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 564-569, 1993
- [2] Brena J. McCarragher and Haruhiko Asada, "A Discrete Event Approach to the Control of Robotic Assembly Tasks", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 331-336, 1993
- [3] 임용희, 홍지민, 이기동, 김대원, 이범희, "페트리 넷을 이용한 유연 로봇 조립설의 시뮬레이션에 관한 연구", 1992 한국자동제어학술회의 논문집, pp.49-54, 1992
- [4] Kenneth Hintz and Daniel Tabak, "Microcontrollers: Architecture, Implementation, & Programming", McGRAW-HILL, 1992
- [5] J.L.Peterson, "Petri Nets and The Model of Systems", Prentice Hall, 1981
- [6] 안인석, 서기성, 이노성, 최준열, 우광방, "페트리 넷을 이용한 자동생산시스템의 성능해석", 1992 한국자동제어학술회의 논문집, pp.353-357, 1992
- [7] Christoph Lindemann, Gianfranco Ciardo, Reinhard German and Günter Hommel, "Perfomability Modeling of an Automated Manufacturing System with Deterministic and Stochastic Petri Nets", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 576-581, 1993
- [8] Ramaswamy S. and Valavanis K. P. "Modeling, Analysis and Simulation of Failures in a Materials Handling System with Extended Petri Nets", Proc. IEEE Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 323-330, 1993
- [9] V. P. KOCHIKAR and T. T. NARENDRAN, "MODELLING AUTOMATED MANUFACTURING SYSTEMS USING A MODIFICATION OF COLOURED PETI NETS", Robotics & Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 9, No. 3, pp. 181-189, 1992
- [10] MengChu Zhou, Frank DiCesare, and Alan A. Desrochers, "A Top-down Approach to Systematic Synthesis of Petri Net Models for Manufacturing Systems", Proc. Int'l Conf. Robotics and Automation, pp. 534-539, 1989
- [11] A. Alan B. Prisker, "Introduction to Simulation and SLAMII", Systems Publishing Co. 1986