

제조시스템의 가공시간 최소화에 관한 연구

- A Study on the Minimizing Processing Time of Manufacturing System -

金成熙*
河正績**

ABSTRACT

Generally, queueing networks, markov chains and simulation techniques are among the most widely used evaluation tools to study computer systems, manufacturing systems etc. But, these tools have some assumptions and difficulties.

So, this thesis presents a method for manufacturing system using Petri nets. Petri nets are a graphical and mathematical modeling tool and are promising tool for describing and studying systems that are characterized as being concurrent, asynchronous, dynamic, distributed and parallel.

It designs Petri net model for processing time of manufacturing system. And it applied to a job shop system composed of 8 machines and 4 different job types.

1. 序論

技術의 진보속도가 따라짐에 따라 제조업체에서는 新製品, 新資材, 新工程등이 迅速하게 導入되고 있는 實情이다. 특히, 消費者의 嗜好變化 多樣化로 인하여 製品의 壽命週期가 단축되고 있는 狀況下에서 企業의 經營戰略은 勞動力, 設備, 製造工程, 情報시스템등의 效率의인 管理로서 費用節減, 生産擴大, 品質向上, 勞動力 不足 對策등의 問題를 解決하고 國內外의 競爭속에서 生存하기 위하여 새로운 環境에 저렴한 비용으로 신속하게 대응하지 않으면 안된다.

제조시스템의 加工시간최소화에는 待期 네트워크 技法, 마르코프 連鎖 技法, 시뮬레이션 技法등이 많이 使用되고 있으나 이러한 技法들의 適用에는 많은 假定과 어려움이 있다. 그러므로 本 研究에서는 이러한 遂行度 評價 技法들보다 同時性(concurrency), 非同期的 事件(asynchronous event), 構造的 相互關係등을 자연스럽게 쉬운방법으로 모형화할 수 있으며, 複雜한 시스템을 圖式的으로 나타내어 視覺化할 수 있고, 模型의 擴張時 토큰, place, transition등의 追加로 간단히 可能的한 페트리네트 技法을 使用하여 生産 工程의 加工時間을 最小化시켜 生産性 向上을 이루고자 하는 것으로 加工時間 最小化를 위한 페트리 네트 模型 設計를 動作部門과 調整部門으로 區分하였다.

本 研究는 페트리 네트에 관한 既存의 文獻 研究를 根據로 하여 製造業體의 生産工程의 加工時間을 最小化할 수 있는 模型을 設計하고 數值例를 통하여 이 模型의 妥當性を 檢證하며, 設備導入時의 意思 決定에 貢獻함으로써 製造企業의 生産性 向上과 設備 效率化에 寄與한다.

* 東亞大學校 大學院 産業工學科

** 東亞大學校 産業工學科 教授

접수 : 1994년 4월 29일

확정 : 1994년 5월 13일

2. 理論的 考察

페트리 넷은 Carl Adam Petri가 1962년에 發表한 論文 Communication with automata에서 처음 紹介된 理論으로서, 事件의 發生이 서로 獨立的이며 非同期的으로 同時에 發生되는 非同期的 同時發生 시스템(asynchronous concurrent system)의 性質을 料明하여, 非同期的 自動操作 시스템으로 모델링하는, 情報傳達의 새로운 모델링 方法으로 提示되었다.

Petri의 概念은 當時, 情報體系 理論(Information system theory)에 關係 研究해은 Applied data research Inc. 所屬의 研究者들에게 注目되었으며, 이 그룹이 시스템과 그들 相互間의 動作을 表現하고 解釋하는 시스템 理論(systemic theory)을 開發하는데 重要的 役割을 遂行하였다. MIT, 특히 computation structures group은 이 分野에 對한 研究를 繼續하여 페트리 넷에 對한 광범위한 理論을 發表하였으며, 이로 인해 페트리 넷의 活用範圍가 크게 擴大되었다.

페트리 넷은 簡潔성과 恰當한 解釋能力을 밑받침으로 하여 非同期的 同時 發生 시스템을 解決하는 重要的 手段으로 脚光을 받게 되었으며, 同時 發生 시스템의 構造와 情報 解釋의 基本 概念에 對한 研究가 擴大되어, Net theory로 불리는 시스템 理論을 낳게 하였다. [1]

最近 페트리 넷에 對한 多樣的 研究가 行하여지면서 더욱 一般的이고 具體的인 理論으로 定立되고 있으며, 過去에는 주로 通信 프로토콜이나 遂行度 評價에 치우쳤던 適用分野가 柔軟生産시스템, 意思決定模型, 뉴럴 네트워크등 으로 多樣하게 擴大되고 있다.

이처럼 페트리 넷(Petri Net)의 適用分野가 다양한 것은 페트리 넷이 가지는 一般性(generality)과 寬容性(permissiveness)때문이다. 이것은 흐름도와 같이 圖式的으로 나타낼 수 있으며 並列的 또는 同時發生的 活動의 表現을 必要로 하는 시스템이나 分野에 쉽게 適用할 수 있다. [1][2][3]

페트리 넷의 두가지 대표적인 適用分野는 遂行度 評價(performance evaluation)와 通信 프로토콜(communication protocol)이다. 有望한 適用分野는 分散 소프트웨어시스템(distributed-software system), 分散 데이터베이스시스템(distributed-database systems), 柔軟生産시스템(flexible manufacturing systems), 離散事件시뮬레이션(discrete-event simulation), 多業處理 시스템(multiprocessor system), 情報計算시스템(data flow computing systems), 論理 프로그램과 VLSI 配列(programable logic and VLSI array)등이며, 事務 情報 시스템 (office-information systems), 人間工學(human factors), 뉴럴 네트워크(neural networks), 意思決定模型(decision models) 등에도 널리 應用된다. [1][4]

많은 學者들이 各자 다른 應用分野에서 페트리 넷을 使用하였는데 이를 살펴보면, Ramamoorthy와 Ho는 페트리 넷에 決定的인 時間을 附與하여 同時發生的이고 非同期的인 시스템의 遂行度評價에 對한 研究하였으며[5], Dubois와 Stecke는 FMS의 動的인 遂行과 實時間 統制에 페트리 넷의 使用을 提議하면서, transition의 集合을 活動의 集合으로, 資源을 프레이스에 割當하는 方法을 提示하였다.[6] Molly는 페트리 넷에 附與하는 時間이 確率的인 境遇에 適用하는 離散時間 確率的 페트리 넷(discrete-time stochastic Petri Net)을 提案했다.[7][8] Narahari와 Viswanadam은 잠금상태(deadlock)와 버퍼의 容量超過(overflow)가 있는 경우의 FMS의 定性的 性質을 時間을 가지지 않는 페트리 넷(Untimed Petri Net)를 使用하여 分析하였다.[9] Ravichandran과 Chakravarty는 各 transition에 代案的인 點火時間을 주어서 Timed 페트리 넷(Timed Petri Net)를 利用하여 FMS에서의 意思決定 시스템을 提示하였으며,[10] Al-Jaar와 Desrocher는 生産시스템의 遂行度 評價를 위한 基本的인 블록의 構築을 위한 GSPN(Generalized Stochastic Petri Net)모델을 提示했다.[11]

3. 模型의 開發

3.1. 假定

3대의 數值制御 機械(M1,M2,M3)와 3가지의 部品(P1,P2,P3)을 生産하는 一種의 裝設 시스템을 考慮하자. 各 部品의 生産루트는 機械加工 順序에 依存하고 各 作業의 加工時間은 決定的으로 주어지고 假定한다. 또한 各 部品의 生産은 반복적으로 이루어진다고 假定하자.

各 部品은 Fig. 1에 나타낸 것과 같이 M1→M2→M3의 가공순서를 가진다.

대기네트워크(Queuing Network)모형에서는 精確한 分析 結果를 얻기 위해 指數分布 서비스 시간과 FIFO法則등이 要求되는 반면에 페트리 넷 모형에서는 各 機械에서 加工하는 部品의 加工順序(Machine Sequencing)를 精確함으로서 作業의 흐름을 調節할 수 있다.

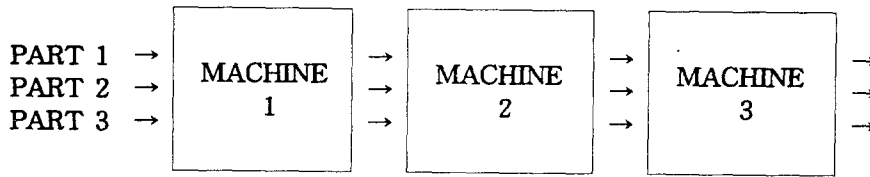


Fig. 1. Machining sequence of each part

각 부품의 生産比(product mix)를 구하기 위해 모든 부품形態(part type)를 決定하는 最小部品集合(minimal part set)의 概念을 導入한다. 위 모형에서 각 부품이 同一한 比率로 生産된다고 假定하면 最小部品集合은 단순히 $S = \{ P1, P2, P3 \}$ 로 標示된다.

一般的으로 要求되는 제품조합에 따라 同一한 잡샷이 最小부품집합내에서 여러번 나타날 수 있다. 예를들어 生産比(production ratio)가 $\{ 1/2, 1/4, 1/4 \}$ 라고 假定하면 對應하는 最小부품집합 $S = \{ P1, P1, P2, P3 \}$ 이다. 이것은 이 部品集合의 반복적 生産이 제품조합을 항상 滿足하게 한다. 生産目標을 達成하기 위해 주어진 機械를 通過하고 이 機械에서 반복적으로 生産되는 最小부품집합내의 모든 부품의 順序를 滿足해야 한다. 예를 들면, 機械 M1, M2, M3를 위한 다음의 順序를 選擇할 수 있다.

$$S1 = \{ P1, P2, P3 \} \quad S2 = \{ P1, P2, P3 \} \quad S3 = \{ P1, P2, P3 \}$$

이 順序들은 단지 하나의 代案만을 表現하였을 뿐이고 다른 여러가지 代案도 可能하다. 이 順序는 機械 加工順序와 같다. 결국, 잡샷 시스템은 生産 순서를 규정하는 動作部門(Operative part)과 기계가공순서(machine sequence)를 정하는 調整部門(control part)의 두 部門으로 나눌 수 있다.

3.2. 加工時間 決定 模型

3.2.1. 動作部門(operative part)

動作部門에서는 이벤트 그래프(event graph)에서 주어진 定義에 따라 工程循環(processing circuit)의 集合으로 모형화 된다. 여기서 각 循環들은 Fig. 1에서 주어진 生産루팅에 따라 각 부품의 循環의인 製造工程을 表現한다.

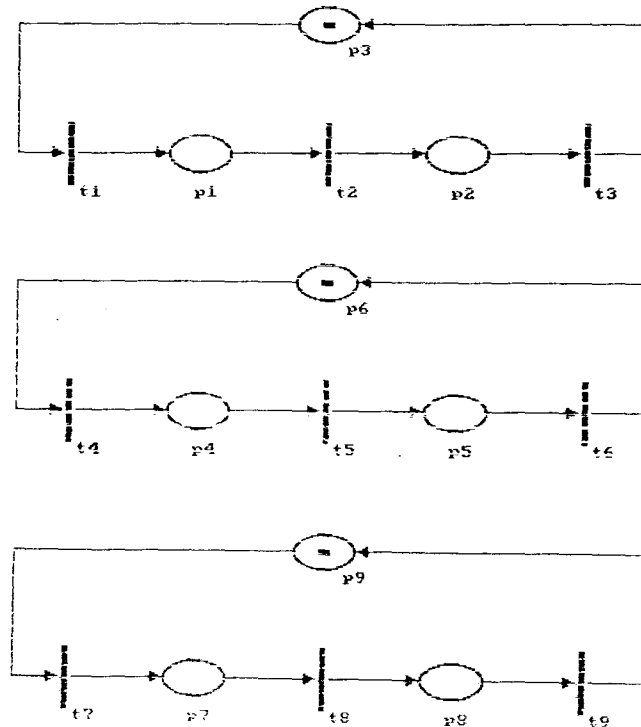


Fig. 2. Processing circuits

Fig. 2에서 각 transition은 각 機械에 의해 遂行되는 作業들을 나타낸다. 예를들면 transition t1은 部品 P1의 製造工程중 첫번째 作業(M1에 의해 수행)을 나타낸다. 각 transition에 주어진 點火時間은 對應하는 機械加工時間으로 주어진다.

이 모형에서 각 部品는 pallet 과 같은 輸送裝備을 각 1대씩 가진다고 假定하면 工程循環내의 토큰의 循環을 주어진 部品形態의 週期的(cyclic)遂行을 意味한다. place는 각 作業(operation)간의 順序인 制約을 나타낸다. 여기서 place는 貯藏버퍼로 解釋할 수 있으며 place내부에 token이 머무는 것은 作業의 待期를 나타낸다.

3.2.2. 調整部門(control part)

각 기계에서 遂行하는 作業의 順序를 모형화하기 위해 循環이 必要하다. 이 循環을 調整循環(control circuit)이라 하고, 주어진 機械가 遂行하여야 할 作業의 連結를 나타낸다. 어떤 循環내의 transition의 順序는 機械에서 遂行되는 作業의 順序에 의해 決定된다. 이 모형에서는 $S1 = \{ P1, P2, P3 \}$, $S2 = \{ P1, P2, P3 \}$, $S3 = \{ P1, P2, P3 \}$ 이다.

Fig. 3은 調整循環을 나타내고 Fig. 4는 工程循環과 調整循環을 함께 나타낸 것이다. 工程循環의 place와 調整循環의 place를 區別하기 위해 調整循環의 place를 control place라 하고 c로 表記하자. 作業部門의 狀態를 나타내는 버퍼 place와 마찬가지로 control place는 機械의 狀態를 表示한다. processing circuit 에는 여러개의 토큰이 存在할 수 있으나 control circuit내에는 오직 하나의 토큰만이 存在할 수 있다. 이것은 한 대의 機械가 어느 한 순간에는 오직 한 가지 作業만 遂行할 수 있기 때문이다. control circuit에서의 토큰의 位置는 機械의 狀態를 明確히 나타낸다. 즉, 토큰이 transition에 位置하면 그 transition이 點火中이며, 그 transition에 該當하는 機械가 作動中임을 나타내고, 토큰이 place의 内部에 位置하는 境遇는 機械가 遊休狀態(idle)인 경우이다.

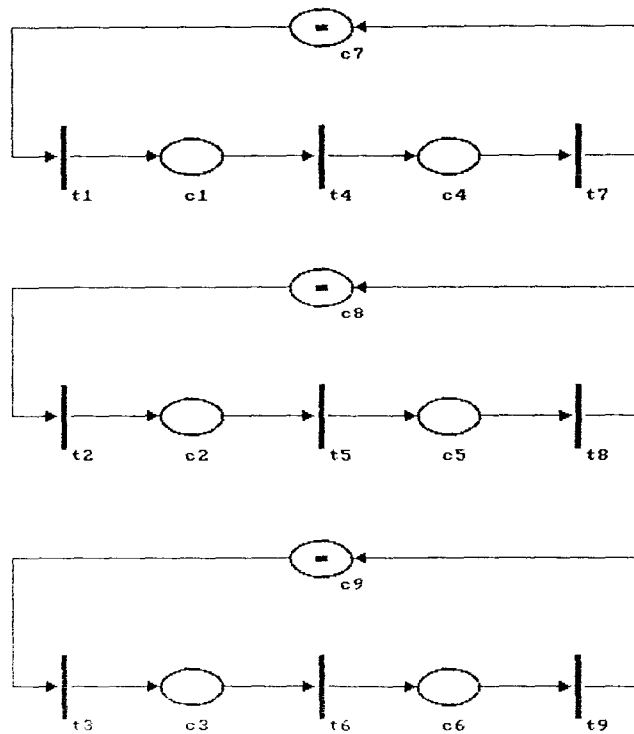


Fig. 3. Control Circuits

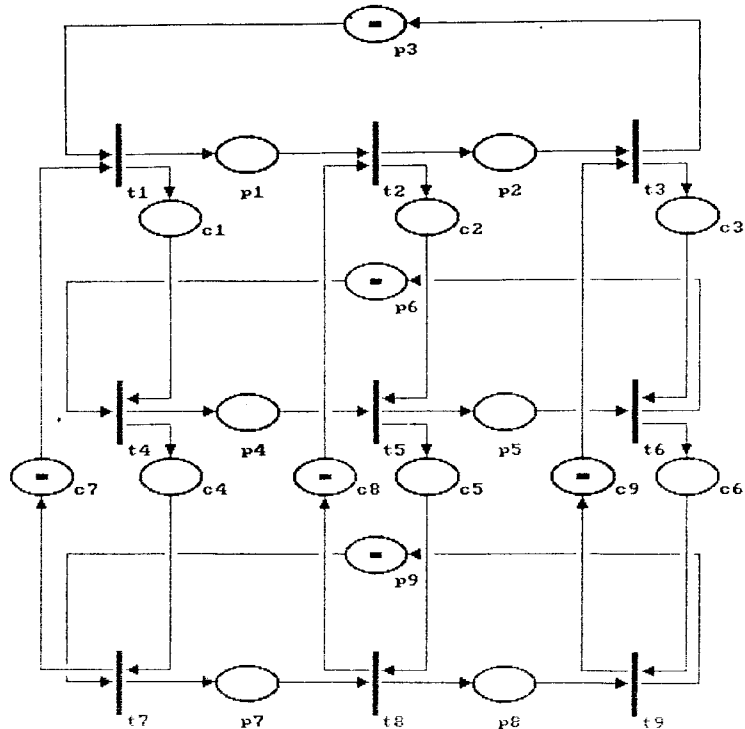


Fig. 4. Processing and Control Circuits

control place의 初期마킹은 첫번째 作業에 의해 決定된다. 예를들면, 위 Fig.3과 Fig.4에서 M1의 control circuit에서 첫번째로 부품1이 遂行될 것이므로 初期에 place c7에 토큰이 位置한다.

이 모형에서는 시스템을 processing circuit과 control circuit으로 分離하여 描寫하였는데, processing circuit에서는 部品の 반복생산을 나타내고, control circuit에서는 機械에서의 作業의 順序를 나타낸다.

3.3. 사이클 타임의 計算

사이클 타임을 計算하기 위해서는 우선 net内部의 모든 基礎循環(elementary circuit)을 定義하여야 한다. 앞 節에서 이미 工程循環과 調整循環은 定義하였고, 이것과는 별도로 버퍼 place와 調整 place를 모두 包含하는 追加의인 循環이 存在한다. 이 循環을 混合循環(mixed circuit)이라 한다. 앞의 잡샛모형은 다음과 같은 9가지 基礎循環이 있다. 모든 循環을 나열한 후 사이클 타임을 구할 수 있다.

processing circuits		control circuits	
γ_1	: p3 t1 p1 t2 p2 t3 (部品 1)	γ_4	: c7 t1 c1 t4 c4 t7 (機械 1)
γ_2	: p6 t4 p4 t5 p5 t6 (部品 2)	γ_5	: c8 t2 c2 t5 c5 t8 (機械 2)
γ_3	: p9 t7 p7 t8 p8 t9 (部品 3)	γ_6	: c9 t3 c3 t6 c6 t9 (機械 3)
mixed circuits			
γ_7	: p3 t1 c1 t4 p4 t5 c5 t8 p8 t9 c9 t3		
γ_8	: p6 t4 c4 t7 p7 t8 c8 t2 p2 t3 c3 t6		
γ_9	: c7 t1 p1 t2 c2 t5 p5 t6 c6 t9 p9 t7		

Property 1 : 基本 循環내의 토큰의 수는 어떤 transition의 點火로도 不變(invariable) 이다.

Property 2 : 모든 基本 循環에 최소한 한개 이상의 토큰이 存在하면 이 이벤트 그래프는 live이다. 이벤트 그래프를 考慮해보면 初期 마킹은 $M_0(p_1)=1, M_0(p_2)=0, M_0(p_3)=1, M_0(p_4)=1$ 이다.

property1은 어떤 到達可能 마킹M에 대하여 循環 γ_1 과 γ_2 내의 토큰의 총수가 $M(\gamma_1)=M(p_1)+M(p_4)$

와 $M(\gamma_2)=M(p_1)+M(p_2)+M(p_3)$ 로 不變(invariant)이고 初期 마킹과 같다. 즉, $M(\gamma_1)=M_0(\gamma_1)=2$, $M(\gamma_2)=M_0(\gamma_2)=2$ 를 意味한다. 두 개의 循環에 각각 1개 以上の 토큰이 存在하므로 Property 2는 네 트가 活性的(live)임을 보증한다. 그렇지 않으면 몇차례의 點火後에 deadlock이 생기면 이것은 dead이다. 만약, 이벤트 그래프가 임의의 노드에서 다른 노드로 가는 直接的인 經路가 존재하면 bound이다. property 1에 의해 각각의 place는 최소한 한개의 基本循環에 包含되어야 하고 그 place내의 토큰의 수는 循環내의 토큰의 수를 결코 超過할 수 없다. 時間을 부여하는 이벤트 그래프(Timed Event Graph)는 transition t에 $\tau(t)$ 로 標記되는 決定的 點火時間을 부여한다. 基本 循環을 $\gamma=(p_1, t_1, \dots, p_n, t_n)$ 로 標記하자. 그러면 循環 γ 의 transition의 點火時間의 合은 $\tau(\gamma)$ 로 표기한다.

$$\tau(\gamma) = \sum_{i=1}^n \tau(t_i) \text{ ----- (1)}$$

循環 γ 내의 토큰 수는 $M(\gamma)$ 로 나타낸다.

$$M(\gamma) = \sum_{i=1}^n M_0(p_i) \text{ ----- (2)}$$

循環 γ 의 사이클 타임(cycle time)은 다음과 같이 定義된다.

$$C(\gamma) = \frac{\tau(\gamma)}{M(\gamma)} \text{ ----- (3)}$$

Property 3. 시스템은 一定 時間 經過後 부터 週期體系를 가진다.

Property 4. 安定狀態(steady state)에서의 사이클 타임은 모든 基礎循環에서 最大로 큰 사이클 타임으로 주어진다. 즉, $C = \text{Max}_{\gamma} (C(\gamma))$ ----- (4)

4. 數值例

4.1. 模型의 適用 概要 및 假定

數值例에 使用된 模型은 순환형 컨베이어 주위에 8대의 機械가 設置된 一種의 鋸屑 제조형태이며, 다음과 같은 假定을 한다.

- ① 原材料의 品切은 發生하지 않는 것으로 한다. 즉, 原材料는 充分한 在庫를 確保하고 있다.
- ② 각 部品의 加工順序는 Table-1과 같다.
- ③ 각 部品의 製造를 위한 각 工程의 作業時間은 Table-2와 같다.
- ④ 部品의 待機空間과 컨베이어는 部品처리에 充分한 容量을 가지는 것으로 한다.
- ⑤ 積載된 部品은 기 決定된 作業計劃에 따라 첫 作業場으로 컨베이어에 의해 移動되고, 만약 作業場이 쉬고 있다면 部品은 즉시 加工되고, 그렇지 않으면 待期한다.

Table - 1. Operation sequence of parts

Parts	Operation sequence
I	L - LB - S - G - I
II	L - S - D - G - I
III	PM - M - D - G - I
IV	L - LB - M - D - G - I

Table - 2. Operation Time of each process

machine \ parts	1 (L)	2 (LB)	3 (S)	4 (PM)	5 (M)	6 (D)	7 (G)	8 (I)
I	3	3	3	0	0	0	6	4
II	4	0	1	0	0	6	5	2
III	0	0	0	3	4	4	3	2
IV	2	4	0	0	4	2	6	4

Table - 3. Token distribution of buffer places

machine parts	1 (L)	2 (LB)	3 (S)	4 (PM)	5 (M)	6 (D)	7 (G)	8 (I)
I	0	0	0	0	0	0	0	1
II	0	0	0	0	0	0	0	1
III	0	0	0	0	0	0	0	1
IV	0	0	0	0	0	0	0	1

Table - 4. Token distribution of control places

machine parts	1 (L)	2 (LB)	3 (S)	4 (PM)	5 (M)	6 (D)	7 (G)	8 (I)
I	0	0	0	0	0	0	0	0
II	0	0	1	0	0	0	0	0
III	0	0	0	1	0	0	0	0
IV	1	1	0	0	1	1	1	1

주어진 수치에 대한 페트리네트를 도시하면 Fig.5와 같다.

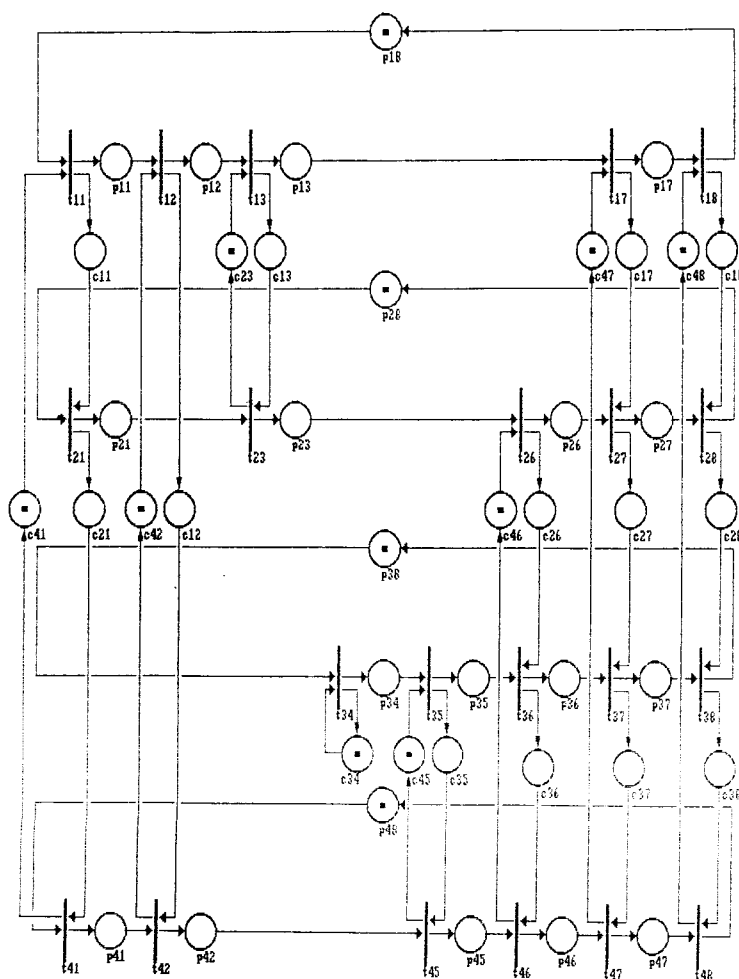


Fig.5. Pert net of the example system

4.2. 適用結果 分析

앞 節의 假定과 資料들을 利用하여 附錄의 컴퓨터 프로그램을 實行하면 다음과 같은 結果를 얻는다.

Table-5. The result of computer simulation of PN(A)

	4 pallet in the system			5 pallet in the system		
	$\tau(\gamma)$	$M(\gamma)$	$C(\gamma)$	$\tau(\gamma)$	$M(\gamma)$	$C(\gamma)$
PROCESSING	19	1	19	19	1	19
	18	1	18	18	1	18
CIRCUITS	16	1	16	16	1	16
	22	1	22	22	2	11
CONTROL	9	1	9	9	1	9
	7	1	7	7	1	7
	4	1	4	4	1	4
	3	1	3	3	1	3
CIRCUITS	8	1	8	8	1	8
	12	1	12	12	1	12
	20	1	20	20	1	20
	12	1	12	12	1	12
MIXED	47	3	15.7	47	3	15.7
	3	1	3	3	1	3
CIRCUITS	48	4	12	48	4	12

앞의 實行結果에서 각 循環의 사이클 타임은 식(3)에 의해서 $\tau(\gamma)/M(\gamma)$ 로 구할 수 있으며, 臨界循環(critical circuit)은 식(4)에 의해 사이클 타임이 가장 큰 循環이 된다. 本 數值例에서는 生産部品の 수가 4가지 이므로 4개의 工程循環을 얻을 수 있다. Table-5에서 시스템내에 4개의 파레트가 存在하는 境遇에는 그중 네번째 循環의 사이클 타임이 22로서 가장 크다. 또한 8대의 機械가 있으므로 調整循環은 8개가 存在하며 Table-5에서 시스템내에 5개의 파레트가 存在하는 境遇에는 그 중 일곱번째 調整循環의 사이클 타임이 20으로서 가장 크다.

각 循環내의 토큰의 수는 初期 마킹에서 決定되므로 遂行度가 初期狀態와 트랜지션의 點火時間에 依存한다. 그러므로 初期 마킹의 토큰의 수를 變化시키면 시스템의 臨界循環과 사이클 타임이 달라진다. Table-5는 初期 마킹의 토큰의 수를 變化시켰을 때의 臨界循環과 사이클 타임이 變化하는 것을 나타낸다. 여기서 새로운 토큰의 追加는 파레트의 追加로 解釋할 수 있다. 臨界循環에 새로운 토큰을 追加함으로써 사이클 타임을 減少시킬 수 있다.

5. 結 論

本 논문에서는 페트리 넷을 利用하여 製造工程의 加工時間을 最小化 할 수 있는 模型을 設計하고 數值例를 통하여 이 模型의 妥當性を 檢討하였다. 本 研究에서 가상적인 數值例를 페트리넷 模型로 分析한 結果, 豫測되어지는 가공시간은 機械의 作業 順序에 따라 크게 變化하였다. 대기 네트워크 模型은 FIFO法則에 依存하는 하나의 結論만을 얻을 수 있으나 페트리넷 模型에서는 파레트의 分布 및 機械加工順序에 依存하여 多様な 分析을 할 수 있다. 여기서 파레트의 追加는 토큰의 追加로 解釋될 수 있으며, 파레트의 追加로 인한 비용요소와 사이클 타임의 減少로 인한 利益을 分析하여 利益이 最高가 되는 파레트의 수를 決定할 수 있다. 또한, 각 機械의 作業 順序를 變化시켜서 出力率이 높은 作業 順序를 찾을 수 있다.

參 考 文 獻

1. T.Murata, "Petri Nets : Properties, Analysis and Applications", Proceedings of the IEEE, Vol.77, No.4, pp.514-580, Apr, 1989.
2. J.M.Proth and H.P.Hillion, "Mathematical tools in Production Management", Plenum Press, 1990.

3. C.Ghezzi, M.Jazayeri and D.Mandrioli, "Fundamentals of Software Engineerings", Prentice-Hall, 1991.
4. S.Somasundaram, "Performance Evaluation of Flexible Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets", Lamar Univ.-Beaumont, 1991.
5. C.V.Ramamoorthy and G.S.Ho, "Performance Evaluation of synchronous Concurrent System Using Petri Nets", IEEE Transactions on Software Engineering, Vol.SE-6, No.5, pp.440-449, Sep. 1980.
6. S.H.Teng and J.T.Black, "Cellular Manufacturing Systems : the Petri Nets Approach", Journal of Manufacturing Systems, Vol.9, No.1, pp.45-54, 1990.
7. M.K.Molly, "Discrete Time Stochastic Petri Nets", IEEE Transactions on Software Engineering, Vol. SE-11, No.4, pp.417-423, Apr. 1985.
8. M.K.Molly, "Performance Analysis Using Stochastic Petri Nets", IEEE Transactions on Computer, Vol.C-31, No.9, pp.913-917, Sep. 1982.
9. Y.Narahari and N.Viswanadham, "A Petri Net Approach to the Modelling and Analysis of Flexible Manufacturing Systems", Annals of Operations Research, Vol. 3, pp.449-472, 1985.
10. R.Ravichandran and A.K.Chakravarthy, "Decision Support in Flexible Manufacturing Systems Using Timed Petri Nets", Journal of Manufacturing Systems, Vol.5, No.2, pp.89-101, 1986.
11. R. Al-jaar and A.Desrochers, "Performance Evaluation of Automated Manufacturing Systems Using Generalized Stochastic Petri Nets", IEEE Transactions on Robotics & Automation, Vol.6, No.6, pp.621-639, Dec, 1990.
12. M.A.Holliday and M.K.Vernon, "A Generalized Timed Petri Net Model for Performance Analysis", IEEE Transactions on Software Engineering, Vol.SE-13, No.12, pp.1297-1310, Dec. 1987.
13. R.Bauman and T.Turano, "Production Based Language Simulation of Petri Nets", Simulation 47:5, pp.191-198, 1986.