

실시간 고장포용 생산시스템의 적정 성능 유지를 위한 최적 설계 기법에 관한 연구

Determination of the Profit-Maximizing Configuration for the Modular Cell Manufacturing System using Stochastic Process

박 승 규
(Seung Kyu Park)

Abstract : In this paper, the analytical approaches are presented for jointly determining the profit-maximizing configuration of the fault-tolerance real time modular cell manufacturing system. The transient(time-dependent) analysis of Markovian models is firstly applied to modular cell manufacturing system from a performability viewpoint whose modeling advantage lies in its ability to express the performance that truly matters - the user's perception of it - as well as various performance measures compositely in the context of application. The modular cells are modeled with hybrid decomposition method and then availability measures such as instantaneous availability, interval availability, expected cumulative operational time are evaluated as special cases of performability. In addition to this evaluation, sensitivity analysis of the entire manufacturing system as well as each machining cell is performed, from which the time of a major repair policy and the optimal configuration among the alternative configurations of the system can be determined. Secondly, the recovery policies from the machine failures by computing the minimal number of redundant machines and also from the task failures by computing the minimum number of tasks equipped with detection schemes of task failure(s) and reworked upon failure detection, to meet the timing requirements are optimized. Some numerical examples are presented to demonstrate the effectiveness of the work.

Keywords : fault-tolerance, real-time, modular cell manufacturing system, performability, recovery policy.

I. 서론

현재까지 생산시스템의 해석 및 운용기법에 관한 다양한 연구가 수행되었다[1]-[3]. 그러나, 많은 연구들이 시스템의 성능 및 신뢰도 해석을 별개로 수행하여 고장이 성능에 끼치는 영향을 고려하지 못하였고, 생산시스템이 실제로 도달하기 어려운 정상상태(steady-state) 해석에 치중하여 실제 운용에 있어 큰 도움이 되지 못했다는 문제점을 갖는다. 최근에는 시스템 구성요소의 고장을 고려한 성능해석기법인 수행성(performability) 해석을 Viswanadham[4]이 시도하였지만, 시스템의 신뢰도 모델링에 있어, 불완전 인자(imperfect factor)를 고려하지 않으므로써, 정확한 모델링을 수행하지 못하였다. 이를 개선한 모델링 기법[5] 역시 대상 생산시스템의 규모가 상대적으로 작고, 성능지표로 순시 가용율(instantaneous availability)만을 고려했다는 한계를 갖는다. 또한, 해석적인 모델에 기초하여 생산율(throughput), 폐기율(scrap rate), 부품 요구량 등의 지표를 고려한 생산 셀의 고장복구기법 개발[6]과 추가 설비비용을 최소화하면서, 생산효율을 극대화시키는 제품 검사와 검사 위치에 대한 설계[7][8] 등이 시스템의 고장에 대한 대처기법으로 연구되었다. 그러나, 기존의 어떤 연구도 생산시스템에서의 시간제약을 고려하지 못했다.

따라서, 본 논문에서는 고장포용 컴퓨터시스템의 성능

해석을 위해 연구된 수행성 해석을 생산시스템에 적용함으로써, 다양한 사용자의 관심에 따른 시스템의 과도해석(transient analysis)을 수행하여 시스템의 고장, 재구성, 수리 등의 동적 상태 변화에 따른 생산시스템의 다양한 성능수준을 평가하였다. 특히, 불확실한 생산환경에서 왜란(disturbance)에 대한 적정 성능유지가 가능한, 고장포용(fault-tolerance) 개념을 갖는 생산시스템의 설계 경향과 복잡한 생산시스템의 고유 특성에 부응한 복합적 시스템 분해와 불완전 인자(imperfect factor)를 고려한 시스템 모델링을 수행하였다. 특히, 가용을 관점에서의 수행성 해석을 통해 적절한 생산시스템의 설계 및 운용 방침(생산시스템의 적정 가용을 유지를 위한 제조 구성요소의 수와 전체 시스템 수리주기 등)을 제공하였다. 또한, 실시간 생산시스템의 개념 정립 및 기반 연구를 수행하였고, 여분의 자원과 검사대상 작업수의 최적값을 계산함으로써, 본 시스템 고유의 특징인 시간제약을 준수하는 최적 고장복구기법을 제시하였다.

II. 실시간 고장포용 생산시스템

1. 고장포용 생산시스템

생산시스템의 신뢰도는 시스템이 요구된 성능수준을 특정 수행시간 동안 유지할 수 있는 능력과 관계된다. 생산설비 자체의 신뢰성 향상(fault-avoidance)에는 한계가 있으므로, 여분의 설비를 갖는 생산시스템 설계, 즉, 고장포용 개념을 도입한 신뢰도의 향상을 꾀할 수 있다. 높은 재구성력은 제조기계의 고장, 주문량의 변화

등의 제조현장에서 일어날 수 있는 불확실한 사건 발생 시 생산시스템을 적은 비용으로 유연성있게 적응시킬 수 있는 척도가 된다. 이외에, 빠른 제품 생산과 시스템의 보수/유지와 관련된 민첩성과 유지성도 동시에 고려된 생산시스템 설계가 이윤의 극대화에 필요하다. 특히, 민첩성의 개념을 확대하면 새로운 시스템의 설계시의 접근 방식으로 실시간 생산시스템의 개념을 기대할 수 있다.

2. 실시간 생산시스템

생산시스템은 양질의 제품을 적정량 생산해서 수요자에게 전달해야 한다. 이때, 생산시스템은 제품을 언제까지 생산하고 전달하여야 한다는 시간제약을 갖는 것이 일반적인데 이를 예정 납기일(due date)이라고 한다. 또한, 각 시스템은 데드라인 준수실패에 따른 손실정도 혹은 이의 성능지표에 대한 영향정도에 따라 유연(Soft) 혹은 경도(hard) 실시간 생산시스템으로 분류될 수 있다. 물론 생산라인이 정상상태에서만 운용된다면, 이러한 시간적인 제약을 준수하는 시스템의 지속적 성능은 충분히 기대될 수 있다. 그러나, 생산시스템 구성요소(제조기계)의 고장(failure), 작업자의 실수, 불량원자재, 제어기의 고장 등 생산시스템을 설계하고 평가하는데 있어서 무시될 수 없는 확률적 요인들이 존재하므로, 시간제약을 준수하기 위한 특별한 운용기법이 개발되어야 한다.

III. 생산시스템의 성능평가와 수행성해석

1. 성능평가

본 논문에서는 불확실한 생산환경에서 왜란에 대한 적정 성능유지가 가능한, 고장포용 개념을 갖는 생산시스템의 설계 경향과 복잡한 생산시스템의 고유 특성에 부응한 모델링을 수행한다. 고장포용 컴퓨터시스템의 성능해석을 위해 주로 연구된 수행성 해석을 생산시스템에 적용함으로써, 사용자의 관심에 따른 다양한 성능지표에 대한 시스템의 과도해석을 수행하여 시스템의 고장, 재구성, 수리 등의 동적 상태 변화에 따른 생산시스템의 다양한 성능수준을 고려한다.

2. 수행성해석

수행성 해석과정은 구조 상태 과정(Structure State Process, SSP)이라 불리는 신뢰도 모델과 본 모델의 성능평가를 위한 보상모델로 구성된다. 생산시스템은 많은 부시스템으로 이루어지고 각 부시스템은 정상동작, 고장, 재구성, 수리 등의 상태변화를 겪는다. 물론 부시스템의 동적 상태변화는 전체 생산시스템의 구조를 변화시킨다. 이러한 각 부시스템과 전체시스템의 동적인 상호관계를 구조 상태 과정을 통해 나타낼 수 있는 것이다.

정의 생산시스템의 구조 상태는 전체 시스템을 구성하는 부 시스템의 상태를 나타내는 벡터이다.

정의 : $Z(u)$ 는 시간 $u \geq 0$ 에서의 생산시스템의 구조 상태를 나타내는 랜덤변수로 이러한 랜덤변수들의 집합, $\{Z(u), u \geq 0\}$ 을 구조 상태 과정(structure state process)라고 한다.

수행성해석을 위한 도구로 Markov 보상모델이 일반적으로 사용된다. Markov 보상모델은 각 상태들을 음수가 아닌 정수로 표시하고, 각각의 상태에 잔류하는 시간

은 상태에만 의존한다고 가정하는 Markov chain에 의한 신뢰도 모델과 각 상태에 적정 보상을 부여하는 보상 모델로 이루어진다.

2.1 신뢰도 모델

시간 t 에서의 시스템 구조상태, $Z(t)$ 에서의 잔류시간이 지수 분포라고 가정하면, $Z(t)$ 는 동질성 CTMC가 되며, 이의 동적 특성을 다음의 전이율행렬(transition rate matrix 또는 infinitesimal generator matrix) $Q = [q_{ij}]_{n \times n}$ 를 통해 파악할 수 있다. 이때, q_{ii} 는 상태 i 에서 상태 j 로의 전이율이고, $q_{ii} = -\sum_{j=1, j \neq i}^n q_{ij}$ 이다. $p_i(t)$ 가 시간 t 에서 상태 i 에 있을 확률을 나타내면, 상태확률 벡터 $P(t)$ 를 다음의 행렬 미분방정식에서 구할 수 있다.

$$P' = P(t) Q \tag{1}$$

(1)의 미분방정식을 풀면 다음과 같이 상태확률 벡터를 구할 수 있다.

$$P(t) = P(0) e^{Qt} \tag{2}$$

특히, CTMC가 ergodic[9] 하면 구조 상태 구조의 상태공간을 S 라고 할 때, 정상상태 확률, $\pi (= \lim_{t \rightarrow \infty} P(t))$ 이 존재하여 (3)과 같은 선형방정식을 세워 구할 수 있다. 이 경우는 CTMC가 흡수상태(absorbing state)를 갖는 경우로 고장상태에 대한 수리가 불가능한 경우에 해당된다고 할 수 있다.

$$\pi Q = 0, \sum_{i \in S} \pi_i = 1 \tag{3}$$

$L_i(t)$ 를 CTMC가 관찰기간, $[0, t]$ 중 상태 i 에서 머문 총 시간의 기대값으로 정의하면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(t) = \int_0^t P(u) du \tag{4}$$

따라서, 벡터 $L(t)$ 는 다음의 미분방정식을 만족시킨다.

$$L(t)' = L(t)Q + P(0); L(0) = 0 \tag{5}$$

의존도 측정

먼저, 편의상 지시 랜덤 변수(indicator random variable)를 다음과 같이 정의한다.

$$I(u) = \begin{cases} 1 & \text{if } Z(u) \in S_O; \text{ operational state} \\ 0 & \text{if } Z(u) \in S_F; \text{ failed state} \end{cases} \tag{6}$$

정의 : 관찰구간 $[0, t]$ 에서의 시스템의 신뢰도는 시스템이 시간 0에서 동작한 후 시간 t 까지 시스템 고장이 발생하지 않고 주어진 작업이 계속 수행될 수 있는 확률을 의미한다.

$$R(t) = P\{I(u) = 1, \forall u \in [0, t]\} \tag{7}$$

정의 : 가용을 관련 지표는 다음의 세가지 대표적 형태를 갖는다.

- 시간 $t \geq 0$ 에서의 시스템의 순시 가용을 $PAV(t)$ 는 시간 t 에서 시스템이 적절한 작업수행을 할 확률이다.
- 구간 $[0, t]$ 에서의 시스템의 축적 동작 시간, $O(t)$ 는 $[0, t]$ 에서 시스템이 동작 한 시간이다.
- 구간 가용율, $IAV(t)$ 는 $[0, t]$ 에서 다음과 같이 정의된다.

$$IAV(t) = \frac{O(t)}{t} \quad (8)$$

앞에서 내린 정의를 바탕으로 다음과 같이 여러 형태의 가용율을 구할 수 있다.

$$PAV(u) = P\{I(u) = 1\} \quad (9)$$

$$O(t) = \int_0^t I(u) du \quad (10)$$

$$IAV(t) = \frac{1}{t} \int_0^t I(u) du \quad (11)$$

특히, 신뢰도 모델을 CTMC로 표현했다면, 다음과 같이 가용율을 나타낼 수 있다.

$$PAV(t) = \sum_{i \in S_0} P_i(t) \quad (12)$$

$$E[O(t)] = \sum_{i \in S_0} L_i(t) \quad (13)$$

2.2. 성능 모델

고장, 수리에 의한 시스템의 상태 변화를 다루는 신뢰도 모델의 수행 후, 각 구조 상태에 대한 성능수준이나 보상율을 나타내는 성능모델(보상모델)을 고려한다. r_i 를 구조상태 i 에 대한 보상율(성능 수준)로 정의하면, r_i 는 시스템이 상태 i 에서 단위시간내에 완성할 수 있는 일의 양을 나타낸다. 일반적으로 r_i 는 현재 상태 i 에만 종속된다고 가정한다.

시간 t 에서의 시스템의 보상을 $X(t) = \gamma_{Z(t)}$ 로 나타낼 때, 시간 t 까지의 축적된 보상(accumulated reward) 즉, $X(t)$ 가 포함시키는 면적은 (14)과 같이 표현할 수 있다.

$$Y(t) = \int_0^t X(u) du = \int_0^t \gamma_{Z(u)} du \quad (14)$$

특히, 보상율을 동작상태는 1, 고장이 난 상태는 0으로 부여하면 가용율 관점에서의 수행성 해석이 가능하다. 즉, $X(t)$ 는 $PAV(t)$ 와 $Y(t)$ 는 축적 동작 시간(cumulative operational time) $O(t)$ 와 상통하게 된다. 또한, 상태 i 에서의 생산율 T_i 를 보상율로 할당하면, 축적 보상 $Y(t)$ 는 작업시간 $[0, t]$ 에서의 총 생산량을 의미하고, $E[Y(t)]$ 는 시스템의 평균 생산량을 의미하게 된다.

3. 성능평가와 수행성 해석의 적용

본 논문에서는 다음과 같은 가정을 바탕으로 대상 생산시스템의 모델링을 수행한다

- 모든 부시스템과 구성요소는 확률적으로 독립관계이다.

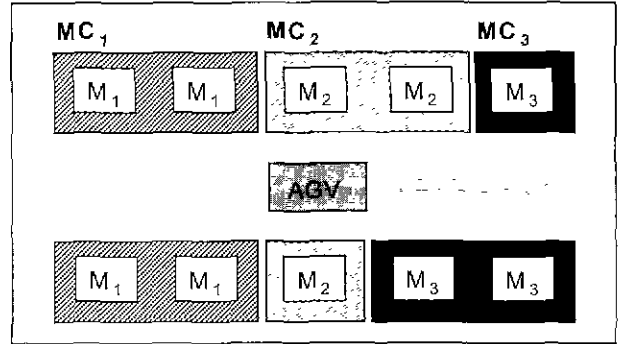


그림 1. 모듈러 셀 생산시스템의 배치도.
Fig. 1 The layout of modular cell manufacturing system.

- 제조기계와 반송기계(AGV)들은 각각 λ_m, λ_{AGV} 의 같은 지수 분포의 고장율을 갖는다.
- 각 부시스템 구성요소에 대한 수리시간은 지수 분포를 갖는다.
- 각 부시스템의 구성요소에 대한 on-line 수리가 가능하다
- 고장과 수리 시간이 부품 가공과 운반 시간보다 장 시간 걸리기 때문에 각 부 시스템에 있어 보상모델(성능모델)은 정상상태에 도달한다.

그림 1은 본 연구에서 고려하는 간단한 모듈러 셀 생산시스템의 배치도이다. 각 제조셀은 동일한 작업을 수행하는 다수의 제조기계로 구성되어, 한 제조 기계에 고장이 발생해도 설정된 작업이 적정 수준까지는 수행될 수 있도록 설계된다. AGV의 수는 공장 설계단계에서 1대 이상으로 확장될 수 있으며, 확장에 따른 시스템 성능분석은 설계단계에서 면밀히 검토되어야 한다.

본 논문에서는 구조 상태 과정 모델에서, 불완전 포용율(imperfect coverage)을 고려한다. 불완전 포용율은 다음과 같이 설명될 수 있다. 복잡한 시스템에서는 공통형 고장(common-mode failure)이 종종 발생하는데, 이것은 복구될 수 없는 시스템 구성요소의 고장이 전체 시스템의 고장을 야기하는 것이고, 이러한 현상에 대한 모델을 불완전 포용율의 개념을 사용해서 나타내면 효과적이다. 예를 들어, 두 개의 동일한 제조기계로 구성된 시스템(제조셀)을 생각하도록 하자. 한 제조기계에 대한 고장발생 시 제조셀은 한 개의 제조기계로 작업을 계속 진행할 수 있다. 이 경우 고장은 cover 되었다고 말한다. 반대로 제조셀이 복구되지 못하고 고장을 일으킨다면, 이 고장은 cover되지 못했다고 말한다. 이때, 한 제조기계의 고장 발생에 대해, 제조셀이 확률 c_m (covered failure)로 복구되거나 확률 $(1 - c_m)$ 로 복구되지 못한다고 가정을 하면, $c_m < 1$ 일 때, 제조셀은 불완전 포용율을 갖는다고 말한다. 불완전 포용율의 도입을 통해 포용율 c_m 와 고장율에 대한 개별 처리가 가능한 것이다. 한편, 포용인자(coverage factor)는 고장주입(fault injection) 실험[10]을 통해 얻을 수 있다. 또한, 시스템의 상태를 모두 고려하는 모델링 대신 요구되는 생산량이 충족되지 못하는

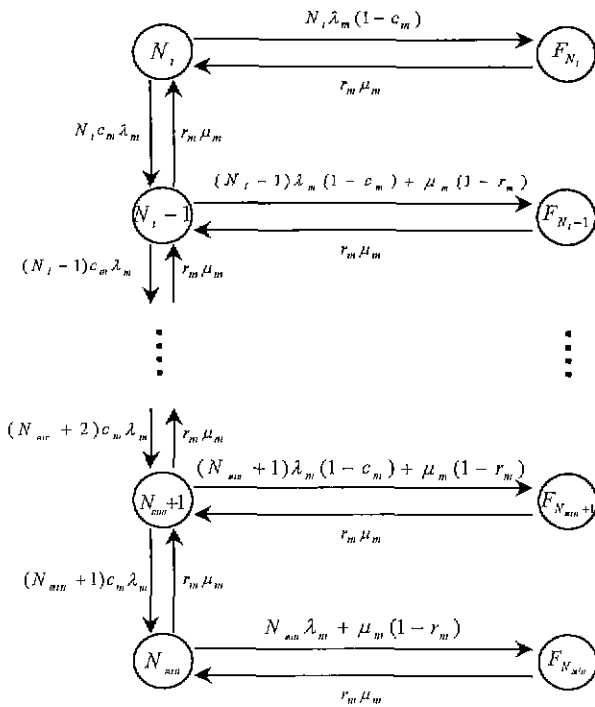


그림 2. 제조셀 i의 구조 상태 모델.
Fig. 2. Structure-state model for machine cell i.

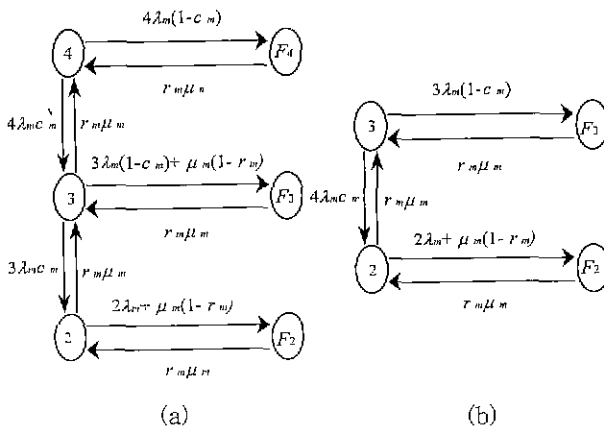


그림 3. 구조 상태 모델 : (a) M1, (b) MC2, MC3.
Fig. 3 Structure state model for M1, 2, 3.

경우는 실질적인 시스템의 고장이 발생한 것으로 간주하는 작업 기반형 모델링(task-based modeling)[5]을 수행한다. 본 방법을 통해 모델링 시 고려되어야 할 상태의 수를 줄일 수 있기 때문에 복잡한 모델링 과정과 요구되는 계산량을 완화시킬 수 있다. 예를 들어, N_i 개의 동일한 기계로 구성된 제조셀 i에서 생산목표를 충족시키기 위해서 적어도 N_{min} 개의 기계가 동작되어야 한다고 하자. 제조기계의 불완전 포용확률은 c_m , 성공적인 고장 수리확률은 r_m , 제조기계의 고장율은 λ_m , 수리율은 μ_m 의 파라미터를 갖는다면 그림 2와 같이 구조 상태 모델을 나타낼 수 있다.

N_{min} 상태는 제조셀 i에서 N_{min} 개의 제조기계가 동작되고 있음을 의미한다. n_i 개의 기계가 제조셀 i에서 동

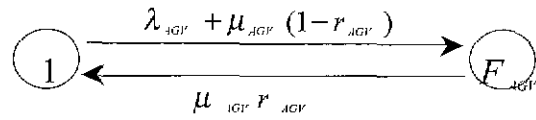


그림 4. AGV의 구조 상태 모델.
Fig. 4. Structure state model for AGV

작되고 있음을 나타내는 상태 n_i 는 $N_{min} \leq n_i \leq N_i$ 경우에는 동작상태가 되지만, 불완전 인자인 $1 - c_m$, $1 - r_m$ 의 영향으로 고장상태 F_i 로 변할 수 있다.

그림 3은 그림 1의 배치를 갖는 제조셀 MC1, MC2, MC3에 대해 총생산 요구량을 충족시키기 위하여 각 셀 별로 최소한 2($N_{min} = 2$)개의 기계가 동작해야 하는 조건이 존재할 때, 본 논문에서 고려한 구조 상태 모델을 수행한 결과를 나타낸다. 이때, MC2와 MC3은 기본 구조가 같기 때문에 동일한 Markov 모델로 설명된다. AGV의 경우도 같은 방법으로 설명할 수 있으며, 1대의 AGV에 대한 구조 상태 모델을 그림 4에 나타내었다.

구한 Q를 (1)에 대입하고 해를 구하면 상태확률 벡터를 구할 수 있다. 수행성 해석을 위한 다음 단계인 보상 모델의 경우는 구조 상태 모델(Markov 모델)의 각 상태에 관심을 두는 보상을 부여함으로써 얻을 수 있고, 3장에서 설명된 방법에 따른 수행성 해석을 통해 시스템의 과도해석을 할 수 있다. 한편, 제조셀 1에 대한 가용을 관점의 수행성 해석을 하면, 순시 가용을 $PAV(t)$, 구간 가용을 $IAV(t)$, 축적 동작시간의 기대값 $E[O(t)]$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$PAV(t) = P_4(t) + P_3(t) + P_2(t) \quad (15)$$

$$IAV(t) = \frac{L_4(t) + L_3(t) + L_2(t)}{t} \quad (16)$$

$$E[O(t)] = L_4(t) + L_3(t) + L_2(t) \quad (17)$$

IV. 제조기계 고장과 작업실패에 대한 최적 복구기법
먼저 다음과 같은 변수들을 정의한다.

- t_i : 제조기계 i의 작업수행시간
- w_i : 제조기계 i의 검사시간
- T_a : 특정 요구량과 품질을 준수하는 n개의 일련 작업으로 이루어진 제품생산을 위해 필요한 실제 제조 소요시간
- b_i : 제조기계 i의 고장확률(이항분포)
- a_i : 제조작업 i의 고장확률
- c_i : 제조기계 i의 검출확률(고장난 기계가 성공적으로 수리되어 제조작업 i를 재작업할 확률)
- m : 시간 제약과 요구품질을 준수한 최종 생산제품 수량
- m_a : 제조기계와 작업고장의 영향을 고려한 생산 시스템내에서 실제 가공된 제품 수량
- D : 생산납기일(특정 요구량과 품질을 가지는 제품 생산에 대한 시간적 제약) 혹은 제품생산을 위

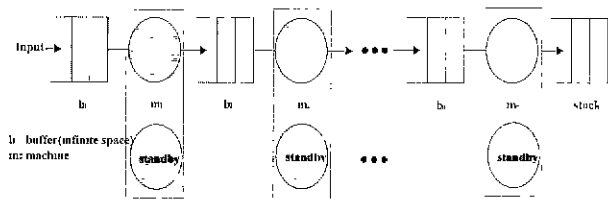


그림 5. 실시간 유연 흐름 생산시스템.
Fig. 5. Real-time flexible flow manufacturing system.

한 일련의 작업에 대한 데드라인

- α : 엄격한 생산 납기일과 적정 품질의 주문량을 만족시키기 위한 여분 제조 기계수의 최소값
- β : 시간제약을 준수하는 검사대상 작업수의 최소값

앞에서 설명된 파라미터를 사용하여, 본 논문에서 고려하는 시간제약은 다음의 부등식을 통해 나타내어진다.

$$T_a \leq D / m_a \tag{18}$$

제조기계 고장, 불량, 재작업(rework) 등이 없는 정상 상태에서는 $T_a = \sum_{i=1}^n t_i$, $m_a = m$ 이므로 항상 (18)을 준수하게 된다. 그러나, 고장이 발생하는 이상상태에서는 생산 손실분에 의한 T_a 와 m_a 의 증가가 예상되므로 2장에서 설명된 기존의 복구 기법으로는 (18)을 만족시킬 수 없다. 따라서, 본 장에서 설명하는 좀더 복잡한 최적 복구작업이 요구된다.

1. 제조기계 고장 복구방안

본 논문에서는 편의상 고장이 날 가능성이 있는 n 개의 제조기계로 구성되고 n 개의 작업(각 작업은 특정 제조기계에 할당된다)을 수행하여 단일 품종의 제품 m 을 생산하는 간단한 생산시스템을 고려하도록 한다.

제조기계 i 에서의 실제 작업 수행시간의 평균값을 t_{ai} 라 하면, 이 값은 예기치 못한 제조기계/작업의 고장처리에 따른 지연으로 순수작업시간 t_i 보다 클 것임을 예상할 수 있다 따라서, 파라미터 t_{ai} 에 대한 다음의 재귀 방정식을 고려할 수 있다.

$$t_{ai} = (1 - p_i) t_i + p_i (t_i/2 + \tau_i + t_{ai}) \tag{19}$$

여기서, τ_i 는 고장난 제조기계를 수리하는데 쓰인 시간비용으로 여분의 예비기계 상태가 warm 상태이면 0, cold 상태이면 s_i , 수리와 재작업 준비를 고려한다면 $s_i + r_i$ 로 분류되어 진다.

이때, (19)의 $t_i/2$ 는 t_i 동안의 고장발생시간의 평균값이고, 고장발생 시간이 구간 t_i 에 균등하게 분포된다는 사실을 통해 얻을 수 있다. (19)를 정리하여 t_{ai} 를 구하면 다음과 같다.

$$t_{ai} = \frac{(1 - p_i/2) t_i + \tau_i p_i}{1 - p_i} \tag{20}$$

따라서, 실제 제공시간 T_a 는 모든 작업단계에 대한 t_{ai} 를 더함으로써 얻을 수 있다.

$$T_a = \sum_{i=1}^n t_{ai} = \sum_{i=1}^n \frac{(1 - p_i/2) t_i + \tau_i p_i}{1 - p_i} \tag{21}$$

m_a 에 대한 관계식도 T_a 의 경우와 비슷한 방법으로 다음의 재귀 방정식을 통해 얻을 수 있다. 이때, 불량품은 모든 단계작업의 종료 시에 완전히 검출되며, 검출되는 불량품만큼 추가생산을 위한 부가공정이 이루어져야 함을 알 수 있다. 따라서, 적정품질을 갖는 m 개의 제품을 생산하기 위해 필요한 실제 생산수량은 작업실패의 영향을 받음을 알 수 있고, 다음의 관계식을 통해 실제 생산수량을 얻을 수 있다($P_n = \text{Pr}[\text{no task failure}]$).

$$m_a = m P_n - (m + m_o)(1 - P_n) \\ = m \prod_{i=1}^n (1 - q_i) + (m + m_o) \left(1 - \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \right) \tag{22a}$$

정리하면,

$$m_a = m / \prod_{i=1}^n (1 - q_i) \tag{22b}$$

제공(WIP, Work-In-Process) 시간동안 두 개 이상의 작업실패가 동시에 발생하는 경우를 무시하면, q_i 는 제법 큰 값이기 때문에, (22)를 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$m_a \approx m / \left(1 - \sum_{i=1}^n q_i \right) \tag{23}$$

따라서, (18)로 나타낼 수 있는 임계조건을 등가적으로 다음의 (24)과 같이 나타낼 수 있다

$$\sum_{i=1}^n \frac{(1 - p_i/2) t_i + \tau_i p_i}{1 - p_i} \leq \frac{D}{m_a} \tag{24}$$

납기일이 매우 엄격하여 (24)를 만족시킬 수 없을 때는, T_a 를 줄이기 위한 복구 기법을 수행해야 하는데, 이것은 여분의 예비기계를 통한 기계고장에대한 즉각적인 복구를 의미한다. 예비제조기계가 cold 상태 혹은 warm 상태에 있는 것 역시 T_a 의 엄격한 정도에 영향을 받는다. 모든 여분의 제조기계를 즉시 가동 가능한 상태로 대기시키는 것은 상당한 비용을 요구하기 때문에, 부가적인 노력과 설비를 줄이는 동시에 시간제약을 준수하는 기계고장에 대한 최적의 복구 기법이 필요하다. 즉, α 로 정의한 즉시 가동 가능한(warm 상태) 대기 제조기계 수의 최소값의 결정이 요구되는 것이다 이러한 복구기법을 다음의 관계식을 통해 표현할 수 있다.

$$\sum_{i=1}^{\alpha} \frac{(1 - p_i/2) t_i}{1 - p_i} + \sum_{i=\alpha+1}^n \frac{\tau_i p_i}{1 - p_i} \leq \frac{D}{m_a} \tag{25}$$

여분의 제조기계가 warm상태에 있다는 것은 $\tau_i = 0$ 을 의미함을 주목한다

이제 (18)을 만족시키기 위한 여분 제조기계 수(α)의 최소값을 계산하기 위한 알고리즘을 다음과 같이 제시할 수 있다.

step 1. τ_i 의 크기를 고려한 작업순서의 개념적인 재배치를 한다. 즉, 실제 작업순서를 변화시키는 것이 아니라, 각 작업의 시간손실에 따라 작업순서를 내림차순으로 분류하는 것이다.

step 2 : α 를 1 부터 증가시키면서 (25)을 검토한다.

step 3 : step 2를 반복하여 (25)을 만족시키는 α 의 최소값을 구한다.

모든 일련의 제조단계에 대한 기계/작업의 고장확률 ($p_i = p$, $q_i = q$), 수리/재시작 비용 ($\tau_i = \tau$), 작업수행시간 ($t_i = t$)등의 특성이 각각 동일하다면 (21), (23), (25)을 사용하여 α 에 대한 closed form를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\alpha = \left\lceil \frac{m(1-p/2+\tau p)}{\tau p} - \frac{D(1-p)(1-nq)}{n\tau p} \right\rceil \quad (26)$$

이때, $\lceil x \rceil$ 은 x 보다 큰 최소 정수를 의미한다.

2. 작업실패 복구방안

작업실패에 대한 복구기법을 최적화하는 과정은 제조 기계의 고장에 대한 경우와 유사하게 다음의 유도과정을 통해 설명할 수 있다.

$$t_{ai} = (1 - q_i c_i)(t_i + w_i) + q_i c_i(t_i + w_i/2 + t_{ai}) \quad (27)$$

작업실패는 작업수행 (t_i)후 즉시 검출되거나 검사 시간의 평균값인 $w_i/2$ 동안 검출되는 상황을 (27)의 오른쪽 항에 나타내었다. 여기서, c_i 는 작업 i 의 실패가 검사 시에 성공적으로 검출될 확률을 의미한다.

따라서,

$$t_{ai} = \frac{t_i + (1 - q_i c_i/2)w_i}{1 - q_i c_i} \quad (28)$$

(18)을 만족시키기 위한 검사 작업수의 최소값을 β 라 하고 (28)을 모든 $i(1 \leq i \leq n)$ 에 대해 합하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\sum_{i=1}^n \frac{t_i + (1 - q_i c_i/2)w_i}{1 - q_i c_i} + \sum_{i=\beta+1}^n t_i \quad (29)$$

한편, 실제 생산되는 제품수량에 대한 다음과 같은 관계식을 만들 수 있다.

$$m_a = m \left(1 - \sum_{i=1}^{\beta} q_i + \sum_{i=1}^{\beta} c_i q_i \right) + (m + m_a) \left(\sum_{i=1}^{\beta} (1 - c_i) q_i + \sum_{i=\beta+1}^n q_i \right) \quad (30a)$$

정리하여 m_a 를 구하면,

$$m_a = \frac{m \left(1 + \sum_{i=\beta+1}^n q_i \right)}{1 - \left(\sum_{i=1}^{\beta} (1 - c_i) q_i + \sum_{i=\beta+1}^n q_i \right)} \quad (30b)$$

따라서, 새롭게 제시한 작업실패에 대한 복구기법에 따른 실시간 생산시스템의 임계 시간조건은 (29)와 (30)을 적용한 (18)과 같은 부등식으로 표현할 수 있다.

제조기계의 고장에 대한 경우와 마찬가지로, 작업실패

확률, 검사주기, 검출 확률 등의 작업의 특징을 고려하여 우선적인 검사대상이 될 작업을 선택하는 adhoc 기법을 제시한다. 먼저 q_i 의 크기를 고려하여 작업순서의 개념적인 재배치를 한다 즉, 각 작업의 실패확률을 내림차순으로 정렬하여 m_a 의 감소에 큰 영향을 주는 작업을 살필 수 있는 것이다. D 가 납기일 대신 특정 작업의 데드라인을 의미한다면(일반적으로 $m=1$ 인 경우에 해당된다), 본 문제는 국부적 실시간 생산시스템의 경우로 바뀌게 된다. 그러나, 광역적 생산시스템과 국부적 생산시스템에 대한 관계식과 그에 따른 운용기법의 차이는 거의 없다

V. 시뮬레이션 및 결과고찰

1 수행성 해석

그림 6과 같은 형태의 모듈러 셀 생산시스템을 고려하도록 하자. 본 생산시스템의 모델링을 위한 데이터를 표 1에서 제시한다. 표 1의 AGV 갯수의 변화에서 알 수 있듯이, 원활한 물류의 흐름을 위한 AGV의 추가설치 문제도 고려해 보도록 한다. 즉, AGV 수의 증가에 따른 생산시스템의 성능분석을 통해 막대한 비용을 감수해야 할 AGV의 추가설치 문제가 생산시스템의 초기 설계시 반영될 수 있는 근거를 제시하고자 하는 것이다 AGV의 추가설치에 따른 생산시스템의 배치변화를 그림 7에서 나타내었다

AGV가 1대인 경우의 생산시스템(그림 6)와 AGV의 수를 2대, 3대로 증가시킨 경우(그림 7)에 대한 수행성 해석을 한다.

먼저, 그림 2에서 제시한 방법으로 신뢰도 모델링을 수행한다. 본 논문에서는 가용을 관점의 수행성에 관심을 갖기 때문에 동작상태에는 1, 고장이 난 상태에는 0

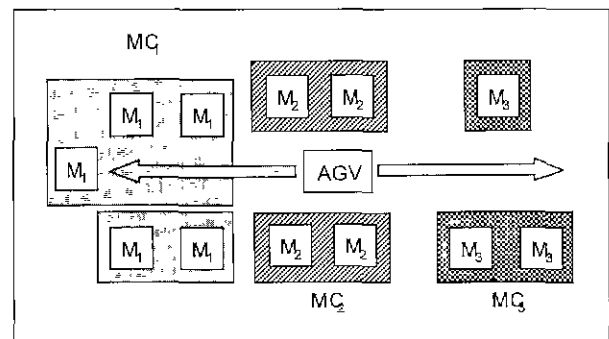


그림 6. 모듈러 셀 생산시스템의 배치도.
Fig. 6. Layout of the modular cell manufacturing system.

표 1. 본 모델링 수행을 위한 데이터.
Table 1. Data for the illustrative example.

	c	μ	λ	r	N_{rm}	N_i
제조셀1	0.8	0.9	0.03	0.8	3	5
제조셀2	0.8	0.7	0.025	0.8	2	4
제조셀3	0.8	0.5	0.02	0.8	2	3
AGV	0.8	0.3	0.01	0.8	1	1,2,3

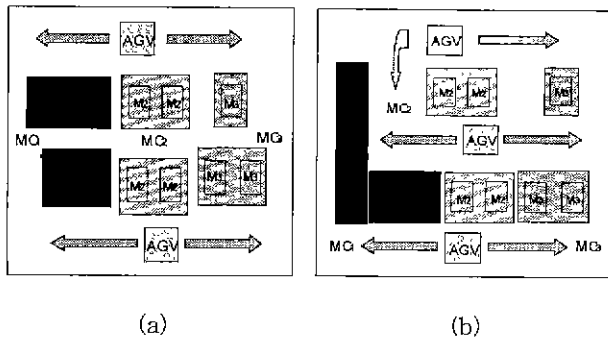


그림 7. AGV의 증가에 따른 생산시스템의 배치 변화 : (a) 2대의 AGV, (b) 3대의 AGV.
 Fig. 7. Alternative layouts of the manufacturing systems in Fig. 5.1 with (a) two AGV's and, (b) three AGV's.

표 2. 대상시스템의 가용율.
 Table 2. Computational results of PAV for the system.

시간 (hour)	제조셀 1 가용율	제조셀 2 가용율	제조셀 3 가용율	AGV(1대) 가용율	가용율
0	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
4	0.9729	0.9799	0.9879	0.9398	0.8851
8	0.9316	0.9368	0.9559	0.8221	0.6858
12	0.9258	0.9265	0.9449	0.7881	0.6387
16	0.9247	0.9238	0.9414	0.7782	0.6258
20	0.9245	0.9230	0.9402	0.7754	0.6221
24	0.9244	0.9228	0.9398	0.7745	0.6209
28	0.9244	0.9227	0.9397	0.7743	0.6206
32	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205
36	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205
40	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205
44	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205
48	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205
52	0.9244	0.9227	0.9396	0.7742	0.6205

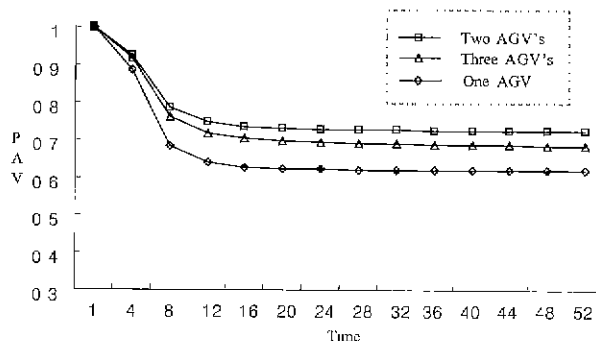


그림 8. 생산시스템의 민감도 해석 (c=0.8, r=0.8).
 Fig. 8. Sensitivity analysis of the manufacturing system for (c=0.8, r=0.8).

으로 보상율을 부여한다. 3장에서 설명된 방법에 의해 구한 각 제조셀과 AGV의 가용율(PAV)과 전체시스템에 대한 가용율을 표 2에 정리하였다
 한편, 본 연구에서 제시한 생산시스템의 해석기법을 통해 민감도(sensitivity) 해석이 가능하다. 이는 이미 언

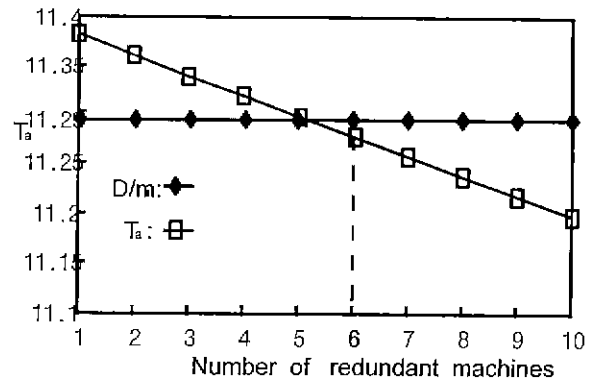


그림 9. 여분기계 수의 변화에 따른 제조기계 고장에 대한 최적 복구기법.
 Fig. 9. Optimal recovery policy from machine failures in varying the number of redundant machines ($\alpha=6$).

급한 AGV의 추가설치 문제에 대한 답의 논리적 근거를 제공할 수 있을 뿐만 아니라, 시스템의 특성을 나타내는 파라미터의 변화에 대한 가용율의 시간적 추이를 나타낼 수 있다. 그림 8는 그림 6, 7의 배치에 대한 생산시스템의 가용율에 대한 시간적 추이를 보인 것으로 1개나 3개의 AGV를 갖춘 생산시스템의 가용율보다 2개의 AGV를 갖춘 생산시스템의 가용율이 더 큰 값을 가지게 됨을 알 수 있다. 즉, 3번째 AGV의 도입으로 인한 가용율의 증가보다 불완전 인자인 c와 r에 의한 감소가 더 큰 영향을 끼치게 됨을 짐작할 수 있다.

2. 최적 고장복구 기법

다양한 고장발생 조건하에서 본 논문에서 제시한 기법에 대한 수치적 예를 제시한다. 이때 모든 변수는 같은 시간단위를 가지는 것으로 가정한다. 수리시간 r_i 와 작업준비시간 s_i 는 각각 구간 [0.7, 1.0]과 구간 [1.7, 2.0]에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 값을 한차례 생성시킨 후 고정값으로 사용한다. 작업수행시간 t_i 의 경우는, 고정값 1.1과 구간 [1.0, 1.2]에서 균일한 분포를 갖는 랜덤 값을 모두 사용했다. 수행 작업의 수 n 은 10을 양질의 제품 요구량 m 의 값으로는 100을 사용했다. 이러한 값들은 다소 임의로 선택되었지만 이러한 선택은 본 논문에서 제시하는 결론에 큰 영향을 주지 않는다.

2.1 제조기계 고장시 복구방안

모든 i 에 대한 p_i, q_i, c_i 는 편의상 각각 같은 값을 갖는 것으로 가정한다. 즉, $p_i=p, q_i=q, c_i=c$ 이며, 본 논문에서는 $p=0.009, q=0.025, c=0.8$ 이 사용되었다. 작업수행시간 t_i 는 구간 [1.0, 1.2]에서 균일하게 분포된 값을 사용했다. Warm 상태에 있어야 되는 여분의 제조기계의 수와 제공 시간과의 관계를 나타내는 예가 그림 9를 통해 설명된다.

납기일 D 는 1425로 모든 여분의 제조기계가 warm 상태에 있는 경우의 값(가장 짧은 시간)과 모든 여분의 제조기계가 cold 상태에 있을 때의 값(가장 긴 시간) 사이에서 적절히 설정된 값이다. 한편, c 는 0.8을 사용했

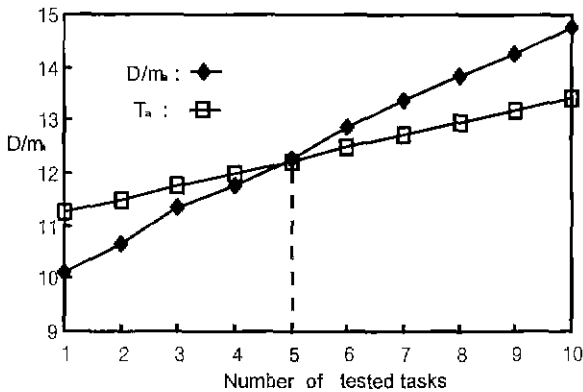


그림 10. 검사대상 작업수의 변화에 따른 작업실패에 대한 최적복구기법.

Fig. 10. Optimal recovery policy from task failures in varying the tasks tested ($\beta=5$).

다. 그림 9를 통해 시간제약을 만족시키면서 양질의 제품 m 을 생산하기 위해서는 warm 상태의 여분 제조기계의 수는 적어도 $6(=\alpha)$ 이 되어야 함을 명확히 알 수 있다.

2.2 작업실패시 복구방안

작업실패의 경우에 대한 모든 파라미터에 대한 조건은 검사시간의 추가에 따른 제공시간의 자연스런 증가를 고려한 납기일의 결정이 이루어져야 하는 점과 동일한 q_i 값을 계산상의 편의를 이유로 부여해서는 안되는 점을 제외하면 기계고장의 경우와 차이가 없다. 각 q_i 는 구간 $[0.025, 0.05]$ 에서 균일한 분포를 갖는 랜덤한 값을 사용했고, $D(=1530)$ 는 양질의 상품 m 을 생산하기 위한 제조소요시간의 최대값과 최소값의 사이에서 임의로 선택되었다. 작업수행시간 t_i 는 고정값 1.1을 사용했다. 이러한 시뮬레이션 환경에서 얻은 검사대상 작업의 수와 제공시간과의 관계를 그림 10에서 제시한다.

$c=0.9, w=0.2$ 를 사용한 경우, 납기일 내에 m 개의 제품을 생산하기 위해서는 검사대상 작업의 수는 적어도 $5(\beta)$ 가 되어야 함을 그림 10를 통해 명확히 알 수 있다. 검사대상 작업의 수가 증가함에 따라, 실제 제조소요시간은 길어지나 실제 생산되어야 하는 제품의 수 m_a 는 줄어든다. 따라서, 제조기계의 고장경우와는 달리, 실제 테드라인은 어떠한 점에 고정되지 않게 되는 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 고장포용 컴퓨터시스템의 성능평가를 위해 주로 연구된 수행성 해석을 생산시스템에 적용함으

로써 사용자 관점의 성능지표에 대한 평가 외에 성능에 대한 신뢰도의 영향을 복합적으로 고려하였다. 또한, 단순히 생산라인을 정지시키고 고장난 제조기계를 고치거나 모든 작업수행을 마친 후 작업실패에 따른 불량품 검출 검사를 하는 기존의 제조기계 고장과 작업실패에 대한 복구기법은 시간 지연이 크기 때문에 양질의 제품생산 요구량에 대한 납기일 혹은 특정 작업의 테드라인을 준수할 수 없음에 착안하여 여분의 제조기계, 검사장비 및 추가설비에 따른 공간 등의 자원을 요구하는 최적 고장복구 기법을 제시했다. 따라서, 기존의 생산시스템에 대한 성능평가 및 운용기법들이 고려하지 못한 다양한 설계 데이터를 얻어냄으로써 생산시스템의 초기 설계 시에 이를 반영할 수 있도록 했다.

참고문헌

- [1] Y. Narahari, N. Viswanadham, *Performance Modeling of Automated Manufacturing Systems*. New Jersey : Prentice Hall, 1992.
- [2] J. A. Buzacott and J. G. Shanthikumar, *Stochastic Models for Manufacturing Systems*. New Jersey : Prentice Hall, 1993.
- [3] Y. Narahari, N. Viswanadham, "Transient analysis of manufacturing systems performance," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 10, no. 2, pp. 230-244, April, 1994.
- [4] N. Viswanadham, Krishna R. Pattipati, V. Gopalakrishna, "Perfromability studies of automated manufacturing systems with multiple part types," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 11, no. 5, pp 692-709. Oct., 1995.
- [5] A. Zakrian, A. Kusiak, "Modeling manufacturing dependability," *IEEE Trans. Robotics & Automation*, vol. 13, no. 2, pp. 161-168, April, 1997.
- [6] J. Kao, et al., "Analysis of operating policies for manufacturing cells," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 33, no. 8, pp. 2223-2239. 1995.
- [7] W. Chow, "Operation policies for multi-product test," *IIE Trans.* vol. 27, pp. 305-310, 1995.
- [8] N. Deliman, et al., "Optimization of process improvement and inspection location for serial manufacturing," *Int. J. Prod. Res.*, vol. 34, no. 2, pp. 395-405, 1996
- [9] S. M. Ross, *Stochastic Processes*. New York : John Wiley & Sons, 1983.
- [10] C. M. Krishna, K. G. Shin, *Real-Time Systems* : McGraw-Hill, 1997.

박 승 규

제어·자동화·시스템공학 논문지 제4권, 제5호, 참조.