

## 모듈러 셀의 운영과 수행성 해석

# Operation and Performability Analysis of Modular Cells

\*허건\*, 장석호\*, 정현호\*, 이상문\*, 우광방\*, 김학배\*

\*연세대학교 기계·전자공학부(Tel :+82-2-361-2767; Fax:+82-2-362-7611; Email:hk21@bubble.yonsei.ac.kr)

### Abstracts

In a fault-tolerant modern manufacturing systems characterized by the configuration, in which automated redundant machines prone to unexpected failures are interconnected with other complex subsystems such as AGV's, robots, computer control systems to produce complete parts, failures together with repairs and reconfigurations should be considered as the three basic events to be modeled for computing the performance of manufacturing systems. In this paper, transient analysis is applied to modular cell manufacturing systems from a performability viewpoint whose modeling advantage is that various performance measures can be evaluated compositely in the context of application. The hypothetical modular cells are modeled firstly with hybrid decomposition method and availability measures as special cases of performability are computed and comments on performability modeling analysis are mentioned.

### Keywords

Performability, Manufacturing, Fault-tolerant system, Markov reward model

## 1. 서론

컴퓨터시스템분야에서 신뢰도 및 성능평가 연구는 매우 활발히 진행되고 있다. 설정된 성능과 신뢰도에 부합되는 시스템 설계시, 시스템 성능과 신뢰도 평가를 위한 모델이 설계되고 이를 통해 설계된 시스템의 설정된 목적에 대한 부합성 예측이 가능하고 시스템 개선 및 재설계에 필요한 부시스템 또는 요소(모듈)를 찾아낼 수 있다. 최근의 고장허용 다중 처리장치 시스템의 개발 및 확산으로 고신뢰도를 갖는 시스템에 대한 보다 정확한 이해를 위해 복합적인 성능 및 신뢰도 평가방법이 필요하다. 고신뢰도를 갖는 고장허용 컴퓨터시스템은 고장발생시 여분요소(redundancy)때문에 고장에 대한 시스템 재구성(reconfiguration)이 가능하고 성능은 다소 저하되나 업무수행을 계속할 수 있는 특징을 가진다. 따라서, 모델관점에서 이러한 시스템의 가능한 다양한 구조와 각 구조와 관련된 성능 수준에 의한 설명이 요구된다. 즉, 가상된 구조와 각 구조가 미치게 되는 시간적 영향 때문에 성능과 신뢰해석을 별도로 하는 것은 적절치 못하므로 이러한 시스템의 평가를 위해서는 복합적인 성능 및 신뢰도 평가가 필요하다는 것이다. Computation reliability, performance reliability, 그리고 performability[1] 등이 시스템운영 시간내에 제공되는 보상에 대한 평가의 바탕이 되는 복합적 측정도의 예가 된다. 신뢰도(reliability), 가용률(availability), 안정도(safety) 및 관련 측정도를 총체적으로는 의존도(dependability), 그리고 수행성(performability)은 수행능력과 의존도의 통합적 개념을 나타낸다. 한편, 제조 기술의 발전과 더불어 자동화 제조 시스템

에서 전체시스템은 기능 및 구조에 따라 모듈 혹은 셀 개념으로 분류가 가능하며, 전체 목적을 수용하도록 통합적으로 구성되며 각 모듈은 첨단 통신망에 의해 유기적으로 상호연계되어 거대한 컴퓨터시스템 형태를 연상하게 된다. 이제 제조시스템은 결국, 제조장치를 비롯하여 로봇, 컴퓨터, 통신 등의 첨단 기술이 통합된 시스템으로 간주된다. 특히, 고장허용 컴퓨터시스템이 사용될 제조시스템현장에서, 제조시스템 자체도 컴퓨터시스템과 유사한 설계 목적을 갖추게 된다. Kusiak은 제조시스템 설계시에 신뢰도와 재구성도에 부응하는 설계를 강조한다[5]. 즉, 제조시스템의 신뢰도는 장기간동안 시스템에 기대하는 성능이 발휘될 수 있는 능력과 관계되며, 신뢰도향상 기법은 시스템의 구성 단계에서 여분의 구성요소가 존재하도록 하는 것이다. 재구성도(reconfigurability)는 신속하게 적은 비용으로 제조시스템이 변환될 수 있는 척도가 된다. 즉, 동적인 재구성이나 신뢰성과 긴밀히 관련이 되는 민첩성(agility)과 영속성(maintainability)도 동시에 고려된 제조시스템 설계가 이윤의 극대화에 유용하며 특히, 민첩성의 개념을 확대하면 실시간 제조시스템의 등장을 기대할 수 있으며 이는 실시간 컴퓨터 시스템에서 제기되는 deadline준수에 의한 실시간 스케줄링 및 운영체제의 필요성을 야기한다. 따라서, 컴퓨터시스템에서의 복합적 신뢰도 및 성능평가 기법의 도입을 통해 자동화제조시스템에 대한 효율적 모델링 및 해석연구를 할 수 있다. 본 연구에서는 자동화제조시스템의 복합적 성능 및 의존도해석을 검토한다. 시스템의 복잡성과 다양성의 증가 경향에 부응하여 새로운 고장의 분류 및 불완전 포용성을 고려했고 과도해석을 통해 제조시스템을 좀더 정확히 이해하도록 한

다. 본 연구의 대상 시스템은 모듈러 셀 제조시스템으로 모듈화된 부품을 생산할 수 있는 일종의 셀 제조시스템으로 볼 수 있으며, 본 연구에서 다루고자 하는 특징을 갖춘 제조시스템이라고 가정한다. 본 연구에서는 먼저 제조시스템의 성능 모델링 및 의존도 연구를 위해 기존 모델에 대한 보완방법을 검토하고, 수행성 해석을 위한 일반적인 방법에 대해 논한다. 다음에는 가상 모듈러 셀 제조시스템을 제안되고 이 시스템의 고장, 수리, 재구성성을 고려한 수행성 해석을 검토한다.

## 2. 제조시스템 성능평가

다양한 해석적 모델링 및 시뮬레이션을 기초로 하여 고려한 제조시스템의 성능평가항목은 제조소요시간(Manufacturing Lead Time), 생산율(Throughput, or Production Rate), 공장생산능력(Capacity or Plant Capacity), 기계가동률(Machine Utilization), 재공량(Work In Process), 가용률(Availability), 신뢰도(reliability), 품질(Quality) 등이다. 이 중에서, 가용률 및 신뢰도는 충분한 검토가 되지 못하고 있으며 이것은 지금까지의 제조시스템의 성능연구에서 시스템의 고장 및 수리단계를 충분히 고려하지 못했기 때문이다. 그러나, 최근에는 예상치 못한 장비의 고장이 시스템 성능에 영향을 미치게 될것을 고려하고 또, 전체 시스템이 상호 유기적으로 연결되는 점을 감안한 시스템의 고장과 수리 및 정상 상태에 대한 의존도 및 관련된 성능연구의 필요성이 인식되고 있으며 이에따르는 제조시스템의 의존도 및 수행성 모델링 등에 관련한 연구가 진행되고 있다[2]. 특히, Viswanadham 등은 셀 제조시스템을 대상으로 한 수행성 해석을 통해 기존의 제조시스템의 가용률 및 신뢰도 모델링보다 앞선 결과를 보였다 [2]. 한편, 일반적으로 진행된 정상상태 해석(steady-state analysis)만으로는 정확한 시스템 해석이 어렵다. 실제 시스템은 정상상태에 도달하는 경우가 극히 드물고 많은 제조시스템의 특성상 과도해석이 정상상태 해석보다 더욱 중요한 경우가 많다 [4]. 특히, 신뢰도(reliability)와 가용률(availability) 그리고, 의존도 모델링은 과도해석 연구에 대한 주요 동기 요인이 된다[4].

본 연구에서는 수행성 관점에서 제조시스템 과도해석을 검토한다. 특히, 제조시스템의 효율적인 모델링을 위해 모듈러 셀 제조시스템을 워크스테이션군과 물류반송시스템군 (Material Handling System)으로 분류하고 이들의 각 부시스템을 공정시간과 고장과 수리의 발생의 빈도의 시간차에 따라 분할하는 복합적 시스템 분해 방법을 제안한다. 또한, 종래의 수행성 모델이 고려하지 못한 고장에 대한 성공적 재구성의 불완정성을 고려한 불완전 포용성(Imperfect coverage)[3]를 포함시키도록 한다.

## 3. 수행성 모델

### 3.1. 수행성 모델링

수행성모델은 의존도모델 혹은 구조-상태 과정(Structure-State Process, SSP)와, 성능-모델 또는 보상-모델(reward model)을 조합하여 구성된다. 의존도모델은 시스템요소의 고장과 수리율에 따른 각 요소들의 동작상태를 표현한다. 시스템요소들의 "가공상태"와 "고장상태"의 각 조합이 의존도-상태가 되고, 모든 의존도 상태들은 시스템 모델의 상태공간이 된다. 따라서, 의존도모델

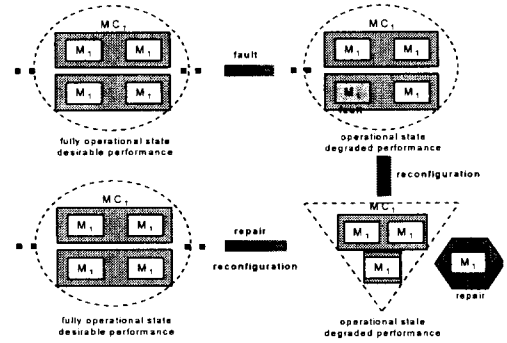


그림 1 모듈러 셀의 고장-재구성-수리 관계  
Fig.1 Fault-reconfiguration-repair relation of modular cell

(구조-상태과정)을 통해 한 상태에서 다른 상태로의 동적 전이를 검토할 수 있다.

정의 :  $Z(u)$ 는 시스템 구성요소의 상태를 나타내는 확률변수로 시스템에 대한 구조-상태라고 하며, 이러한 확률변수들의 집합  $\{Z(u), u \geq 0\}$ 을 구조-상태 과정 (SSP)라고 한다.

시스템상태들은 음수가 아닌 정수로 표시되고, 각각의 상태에 잔류하는 시간은 그 상태에만 의존한다고 가정하여 구조-상태과정을 Markov Chain으로 설명한다. 성능-모델 또는 보상-모델은 각 구조-상태과정의 의존도 상태에 대한 성능수준 이나 보상율을 나타낸다. 성능수준  $r_i$ 은 시스템이 상태  $i$ 에서 단위시간내에 완성할 수 있는 일의 양을 나타낸다. 일반적으로  $r_i$ 는 현재 상태에만 종속된다고 가정한다. 적절한 성능수준은 대상시스템의 종류에 따라 다양하게 결정된다. 즉, 통신 시스템에서는 통신채널 혹은 네트워크의 대역폭이 될 수 있고, 실시간 시스템에서는 deadline을 넘긴 작업의 비율이 될 수 있으며, 제조시스템에서는 원하는 성능지표에 따라 생산율 혹은 제조소요시간이 될 수 있다.

### 3.2. Markov 보상모델

구조-상태와 보상 모델을 동시에 나타낼 수 있는 모델링 기법으로 Markov 보상 모델이 쓰인다. 시간  $t$ 에서의 시스템 구조상태를 나타내는  $Z(t)$ 에서의 잔류시간이 지수적 분포라고 가정하면,  $Z(t)$ 는 동질성연속시간 Markov Chain(CTMC)이 되며, 이의 동적 특성은 다음의 전이율행렬(rate matrix 또는 generator matrix)  $Q = [q_{ij}]_{n \times n}$ 를 통해 파악할 수 있다. 이때,  $q_{ij}$ 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 열벡터를 다음의 행렬 미분방정식에서 구할 수 있다.

$$\dot{P} = P(t)Q \quad (1)$$

Markov chain의 정상상태 확률 벡터  $\pi$ 는 식(2)에서의 선형시스

템에 대한 해이다.

$$\pi Q = 0, \quad \sum_{i \in S} \pi_i = 1 \quad (2)$$

이때,  $\gamma_i$ 를 구조-상태  $i$ 에 대한 보상율(성능 수준)로 정의하면  $\gamma$ 은 보상구조를 나타내는 벡터이다. 시간  $t$ 에서의 시스템의 보상을  $X(t) = \gamma_{Z(t)}$ 로 나타낼 때, 시간  $t$ 까지 축적된 보상 즉,  $Y(t)$ 가 포함시키는 면적은 식 (3)와 같이 표현할 수 있다.

$$Y(t) = \int_0^t X(u) du = \int_0^t \gamma_{Z(u)} du \quad (3)$$

따라서, 보상을 성능 수준으로 해석할 때, 축적된 보상의 분포를 통해 다른 보상율(성능수준)을 갖고 상태가 변하는 시스템의 특징을 살필 수 있다. 이때, 축적된 보상분포는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_Y(y, t) = \Pr(Y(t) \leq y) \quad (5)$$

특히, 보상율을 동작상태에서는 1, 고장이 난 상태에서는 0으로 부여하면 가용율(interval availability)을 고려할 수 있고, 기대값을 통해서 구간  $(0, t)$ 에서 시스템의 시간 평균 성능을 구할 수 있다. 본 연구에서의 대상시스템은 제조시스템이기 때문에, 보상율로 생산율(Throughput, T) 또는 제조시간(Lead Time) 등의 제조시스템의 성능지표를 생각할 수 있다. 따라서, 적절한 보상의 부여로 고장가능성이 있는 제조시스템 성능의 다양한 면에 대한 통합적인 검토를 할 수 있다. 순시 가용율(PAV)과 순시보상의 기대값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$PAV(t) = \sum_{i \in S_0} P_i(t) \quad (6)$$

$$E[X(t)] = \sum_{i \in S_0} \gamma_i p_i(t) \quad (7)$$

### 3.3. 수행성 분포와 모멘트

위의 기법에 의해 시스템 모델이 개발된 다음에는 시스템의 과도해석을 위해 수행성 분포혹은 이의 모멘트를 구해야 한다. 수행성의 모델연구에서 Laplace 변환과 수치적인 역변환을 이용한 방법이나 균일화 기법을 사용한 경우 또는 편미분방정식의 해로써 나타내는 방법 등 어느정도는 수행성 분포와 이의 모멘트를 구하는 윤곽이 설정되나, 일반화시키기에는 아직 부족하다[1].

본 연구에서는 수행성 분포 및 모멘트를 구하는 효율적인 방법의 개발에 관심을 둔다. 이를 위해서는 모델링 결과에 의한 평가 이전에, 모델링 측면에서의 변화를 검토하는 것이다. 즉, 상태의 분해(decomposition)와 집합(aggregation), 그리고 절단(truncation) 등을 통한 시스템 모델링 자체의 효율적 수행이다. 본 연구를 통해 기존의 컴퓨터시스템에 대한 수행성 모델링 기법을 제조시스템에 적용될 수 있도록 수정하고 보완한 모델을 가까운 시일내에 제시코져 한다.

## 4. 제조시스템의 수행성 해석

본 연구의 대상 시스템인 모듈러 셀 제조시스템을 고장발생시에 저하 성능으로 동작가능한(degradable) 여분의 시스템 구성요소로 이루어진 고장허용시스템으로 정의한다. 먼저, 전체 제조시스템을 부시스템의 특성에 따라 워크스테이션군인 제조셀과 물류반송시스템군으로 나눈뒤, 수행성 모델링기법을 각 부시스템에 적용하여 수행성 관련 성능지표를 구한다. 대상 제조시스템의 효율적 모델링을 위해 다음과 같은 가정을 한다.

- 1) 모든 부시스템과 구성요소는 확률적으로 독립관계 이다.
- 2) 제조기계들과 반송기계(AGV)들은 각각  $m_i$ , (AGV의 똑같은 지수 분포의 고장율을 갖는다.
- 3) 각 부시스템 구성요소들에 대해 수리시간이 지수 분포를 가진다.
- 4) 각 부시스템의 구성요소에 대해 on-line 수리가 가능하다.
- 5) 고장과 수리 시간이 부품 가공과 운반 시간보다 장시간 걸리기 때문에 각 부시스템에 있어 보상모델(성능모델)은 정상상태에 도달한다.

그림 2는 모듈러 셀 제조시스템의 배치도이다. 각 제조셀은 동일한 작업을 수행하는 다수의 제조기계로 구성되, 고신뢰도를 위해 한 제조 기계에 고장이 발생해도 설정된 작업이 수행될 수 있도록 다양한 작업경로를 가지도록 설계된다. AGV의 대수는 공장설계단계에서 1대이상으로 확장될 수 있으며, AGV의 확장에 따른 시스템 성능분석은 용이하게 검토될 수 있다. 각 제조셀 및 반송기계군에 대해 Markov 보상 모델을 적용하여 수행성 해석이 가능하다. 특히, 본 논문에서는 구조-상태 과정(의존도 모델)의 모델링에서, 구성시스템의 고장 발생시 시스템이 성공적으로 재구성할 수 있는 확률  $c$ (coverage)와 전체 시스템 상태를 고려하지 않고 요구되는 생산이 충족되지 못하는 경우는 시스템에 고장이 발생한 것으로 간주하여 전체 시스템의 상태를 줄이는 보다 실리적인 모델링 기법이 고려된다[3].

그림 3은 그림2의 배치를 갖는 제조셀 MC1, MC2, MC3에 대해 총생산 요구량을 충족시키기 위하여 각 셀별로 최소한 2개의 기계가 동작해야 하는 조건과 고장에 대한 불완전한 재구성을 고려한 Markov 모델(구조-상태 모델)이다. 이때, MC2와 MC3은 기본구조가 같기 때문에 동일한 Markov 모델로 설명된다.

각 Markov 모델에 대해 구한 전이행렬  $Q$ 를 그림 4에 나타내었다. 이때,  $\lambda_m$ 은 각 제조기계의 고장율이고  $c_m$ 은 coverage,  $r_m$ 은 고장수리율,  $\mu_m$ 은 수리율 이다. 반송장치에 대해서도 같은 방식으로 설명할 수 있다. 각 모델에 대한 전이행렬을 식(2)에 대입하여 상태확률 벡터를 구할 수 있으며 이 백

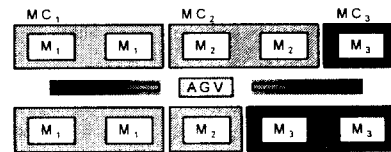
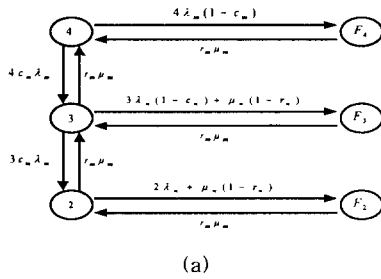
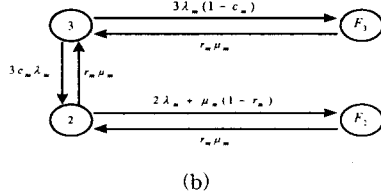


그림 2 제조시스템의 배치도

Fig. 2 The layout of modular cell manufacturing system



(a)



(b)

그림 3. 제조셀의 Markov 모델:

(a) MC1, (b) MC2, MC3

Fig. 3 Markov model of MC1,2,3

터를 이용해 신뢰도 및 가용율 등의 의존도에 대한 해석이 가능하다. 수행성 모델의 다음 단계인 보상 모델의 경우는 Markov 모델의 각 상태에 관심을 두는 보상(성능수준)을 부여함으로써, 얻을 수 있다. 위의 방법을 통해 수행성의 분포(축적된 보상 확률 분포) 혹은 이들의 모멘트를 구할 수 있기 때문에 시스템의 과도 해석이 수행될 수 있다. 그림 5와 그림 6은 MC1에 대해서 다양한 포용율과 수리율에 따른 수행성의 특별한 경우인 가용율의 시간적 변화를 나타낸 것이다.

### 5. 결론

본 연구에서는 자동화제조시스템이 고장발생시에 저하 성능(degradable)으로 동작가능한 고장허용 시스템으로 구성하여 의존도가 성능에 미치는 영향 평가가 가능한 수행성 관점에서의 제조시스템의 모델링이 검토되었다. 먼저 (1) 복합적인 성능과 의존도 해석기법인 수행성 모델링을 검토하고, (2) 수행성해석을 위한 수학적인 모델(Markov 보상 모델)이 제시하였으며, (3) 이 기법의 제조시스템(모듈러 셀 제조시스템) 적용 예를 검토하였다. 특히, 제조시스템의 효율적인 모델링을 위해 전체 시스템을 워크스테이션군과 반송시스템군으로 분할하고, 이들 각각의 부시스템을 공정시간과 고장과 수리의 발생빈도간의 시간차에 따라 나누는 복합적 시스템 분해 방법을 제안하고, 불완전 포용성(imperfect coverage)를 고려한 수행성 모델을 통한 과도해석 기법이 검토되었다.

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} 4 & 3 & 2 & F4 & F3 & F2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 4 \\ 3 \\ 2 \\ F4 \\ F3 \\ F2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -4\lambda_m & 4c_m\lambda_m & 0 & 4\lambda_m(1-c_m) & 0 & 0 \\ r_m\mu_m & -(3\lambda_m + \mu_m) & 3c_m\lambda_m & 0 & 3\lambda_m(1-c_m) + \mu_m(1-r_m) & 0 \\ 0 & r_m\mu_m & -(2\lambda_m + \mu_m) & 0 & 0 & 2\lambda_m + \mu_m(1-r_m) \\ 0 & 0 & 0 & -r_m\mu_m & 0 & 0 \\ r_m\mu_m & 0 & 0 & 0 & -r_m\mu_m & 0 \\ 0 & 0 & r_m\mu_m & 0 & 0 & -r_m\mu_m \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(a)

$$Q = \begin{matrix} & \begin{matrix} 3 & 2 & F3 & F2 \end{matrix} \\ \begin{matrix} 3 \\ 2 \\ F3 \\ F2 \end{matrix} & \begin{bmatrix} -3\lambda_m & 3c_m\lambda_m & 3\lambda_m(1-c_m) & 0 \\ r_m\mu_m & -(2\lambda_m + \mu_m) & 0 & 2\lambda_m + \mu_m(1-r_m) \\ r_m\mu_m & 0 & -r_m\mu_m & 0 \\ 0 & r_m\mu_m & 0 & -r_m\mu_m \end{bmatrix} \end{matrix}$$

(b)

그림 4 제조셀의 전이행렬:

(a) MC1, (b) MC2, MC3

Fig. 4 The transition matrix of MC1,2,3

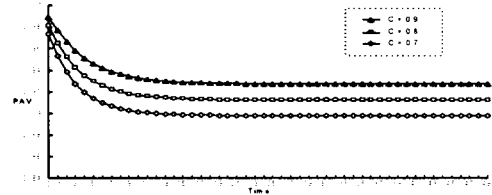


그림 5 MC1의 순시가용율

Fig. 5 PAV analysis of the MC1

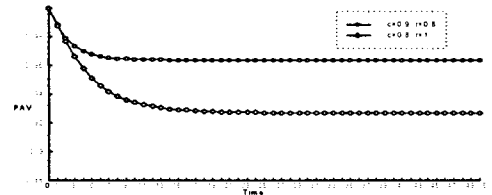


그림 6 표용율과 수리율의 변화에 따른

MC1의 순시 가용율

Fig. 6 The effect of the the repair factor and coverage on PAV

### 참고문헌

- [1]K. R. Pattipati, Y. Li, H. A. P. Blom, "A Unified Framework for the Performability Evaluation of Fault-Tolerant Computer Systems," *IEEE Trans. on computers*, vol.C-35, no.9, pp.312-326, September 1986.
- [2]N. Viswanadham, K. R. Pattipati, V. Gpalakrishna, "Perfromability Studies of Automated Manufacturing Systems with Multiple Part Types," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, vol.5,no.5, pp.692-709,October 1995.
- [3]A. Zakrian, A. Kusiak, "Modeling Manufacturing Dependability," *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, vol.13, no.2, pp. 161-168, April 1997.
- [4]Y. Narahari, N. Viswanadham, "Transient Analysis of Manufacturing Systems Performance", *IEEE Trans. on Robotics & Automation*, vol.10, no.2, pp.230-244, April 1994.
- [5]A. Kusiak and G.H. Lee, "Design of Parts and Manufacturing Systems for Reliability and Maintainability", *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol.13, no.1, 1997, pp.67-76.