

퍼지-랜덤 변수를 이용한 실시간 제어 시스템의 성능 및 신뢰도 평가기법 연구

Evaluation of the Performance and Reliability of a Real-Time System Using Fuzzy-Random Variables

민 병 조, 이 석 주, 김 학 배
(Byungjo Min, Seok-Joo Yi, and Hagbae Kim)

Abstract : To flexibly evaluate performance and reliability of a real-time system which is intrinsically characterized by stringent timing constraints to generate correct responses, we propose fuzzy-random variables and build a discrete event model embedded with fuzzy-random variables. Also, we adapt fuzzy-variables to a path-space approach, which derives the upper and lower bounds of reliability by using a semi-Markov model that explicitly contains the deadline information. Consequently, we propose certain formulas of state automata properly transformed by fuzzy-random variables, and present numerical examples applying the formulas to RTP(Rapid Thermal Process) to show that a complex system can be properly evaluated based on this model by computer simulation.

Keywords : fuzzy-random variable, real-time systems, performance, reliability evaluation

I. 서론

일반적으로 유동적인 제어 시스템의 동적특성을 표현하는 형태로 크게 세 가지의 모델링 기법을 고려할 수 있다. 시연속 시스템을 표현하는데 있어서는 미분 및 차분 방정식은 오랜 역사를 갖고 있는 한편, 고성능 컴퓨터의 출현과 함께 이산 사건 모델링의 활용이 중요해졌고, 급속한 속도로 발전하는 컴퓨터의 성능과 더불어 복잡한 생산시스템, 통신 및 컴퓨터 시스템 등의 인위적 시스템의 분석 및 설계 등의 분야에서 더욱 중요한 역할을 담당하게 되었다. 미분 및 차분 방정식은 그 특성상 해석적 또는 수치적인 분석이 가능하지만 좀 더 복잡한 유동시스템을 표현하는데는 그 한계가 있으며, 이러한 복잡한 시스템의 표현하는데 있어서 수치적인 분석에 의존하는 이산 사건 모델링이 발전된 컴퓨터의 잠재력을 더욱 구체적으로 활용한다는 측면에서 더 유연하며 효과적일 수 있다. 실제로 복잡한 반도체 생산 공정중에는 웨이퍼에 열을 가하는 공정뿐만 아니라 다른 형태의 여러 공정도중에도 다양한 종류의 예측 불가능한 고장 또는 기기의 오동작이 발생할 수 있으며 이는 특히 고속열처리장비(RTP; Rapid Thermal Process)[1][2]등과 같은, 그 기능이 입력 및 운영조건에 민감한 기기에서의 Throughput과 수율(yield)에 심각한 영향을 미치고 있다. 대부분의 상용시스템에서 상태 방정식 분석을 이용한 여러 가지 성능측정법 및 성능지수들이 제시되었고 사용되어 왔다.

그러나 실시간 시스템에서는 요소 오류의 결과가 전체 시스템의 재난으로 이어질 수 있고, 동작 환경과 작업부하에 대한 정보의 전체 시스템의 성능 및 신뢰도에 대한 영

향이 일반적인 시스템에 비해 상대적으로 중요하다[3]. 그러므로, 시스템의 성능은 다른 여타의 시스템과는 달리 시제약성과 계산 시간 지연(CTD; Computation Time Delay)을 중요하게 고려해야 한다는 측면에서 차별화 될 수 있다[4]. 또한 일반적으로 실시간 시스템에서 신뢰도는 시스템 고장의 위급성을 적절하게 표현한다는 측면에서 성능과 더불어 시스템을 평가하는 기준으로서 매우 중요한 평가지수의 하나로 인식되어 왔다. 그러므로 기존의 성능 및 신뢰도 평가 기준으로서는 평가하기에 부적절할 수 있는 실시간 제어 시스템의 성능 및 신뢰도를 시간 및 논리정보를 통합하여 더욱 정확하게 평가하는 방법에 대한 연구가 필요하며, 이는 실시간 시스템적 관점에서 내장형 제어기에 의해 운용되는 반도체 공정기기의 하나인 RTP 시스템에의 응용 예로 직접적으로 적용할 수 있는 중요한 결과로 이어지게 된다. 지금까지 시연속 유동 시스템의 경우[5]와 달리 이산 사건 시스템의 경우 시계수 제한성에 연관되어 성능을 측정할 연구는 거의 이루어지지 않았다. 실시간 시스템에서 시제한성 또는 계산 시간 지연은 기본적으로 시스템의 상태를 운영하는 시스템 유동성에 의존하게 된다. 그러나 실시간 제어 시스템에서 확률적으로 또는 Stochastic하게 변동하는 상태들을 객관적으로 표현하거나 기존의 모델들로 분석하기엔 어려운 상황이다. 따라서 실시간 시스템의 시제한성에 의해 심각하게 영향받는 시스템 상태를 표현하기 위해서는 새로운 접근 방식의 시스템 모델링 및 평가기법이 필요하게 된다. 또한, 시제한성을 시스템 상태 또는 시지연으로 인해 초래된 시스템 비용으로 정확하게 대응시키는 것도 용이하지 않으므로, 본 논문에서는 이러한 두 가지 종류의 값들을 대응시키는 방법으로서 퍼지 Reasoning 기법을 사용하였다. 그러므로 시스템 상태들의 출현은 확률적으로 모델링되고 각 시스템 상태들은 비용이나 시지연 자체에 관련된 퍼지 로직을 사용하여 표현한다. 결국 이러한 시스템 상태들의 진행현황을

접수일자 : 1999. 10. 4, 수정완료 : 2000. 2. 7.

민병조, 김학배 : 연세대학교 전기·컴퓨터공학과

이석주 : KIST 지능제어연구센터

※ 본 논문은 1998년도 한국학술진흥재단에서 지원하여 연구하였습니다.

퍼지-랜덤 변수를 활용하여 나타내고, 이를 실시간 제어 시스템의 시정보에 연관된 사건들의 퍼지성과 랜덤성을 분석하는데 사용하였다. 실제로 이전에 이와 연관된 연구로는 [6]에서 퍼지-랜덤 변수의 개념을 $F:\Omega \rightarrow F(R)$ 이 소개된 바 있고, [7]에서는 퍼지-랜덤 변수의 표기를 $F:\Omega \rightarrow F(R^n)$ 과 같이 정의하였다. 이때, (Ω, A, P) 는 확률 공간이며, $F(R^n)$ 은 $u: R^n \rightarrow [0, 1]$ 인 함수로 $\{x \in R^n; u(x) \geq \alpha \exists \alpha \in (0, 1)\}$ 의 조건을 만족시켜야 한다. 그러나, 이러한 연구결과들에서는 단순히 수학적으로 퍼지-랜덤 확률 함수를 정의할 뿐, 실시간 제어 시스템에 적용 가능한 퍼지-랜덤 변수들의 기본적인 원리에 관련된 성과는 소홀하였다고 할 수 있고, 따라서 연구결과의 응용가능성을 추정하기가 어려웠다. 이에 반해 본 논문에서는 퍼지-랜덤 변수들을 물리적인 의미를 부여할 수 있는 방식으로 정의하면서, 퍼지-랜덤 사건의 확률을 유도하기 위한 원리를 제안하며, 이를 활용하여 기본적인 DES 모델링 기법중의 하나인 상태 오토마타를 표현하고, 각각의 사건에 적절한 보상값을 부여함으로써, 이러한 결과들을 통해 일반적인 실시간 시스템의 성능 및 신뢰도를 평가하는 기법을 개발하고자 한다. 또한, 표출된 결과를 반도체 공정기인 RTP 시스템에 적용하여, 고장 및 지연요소들을 포함한 통합적인 시스템의 성능 및 신뢰도를 평가하는 예제를 통해 활용유효성을 설명하고자 한다.

II. 퍼지-랜덤 변수가 포함된 상태 오토마타

본 장에서는 퍼지-랜덤 변수의 정의를 소개하고, 어떻게 그 변수들이 유동 시스템들의 사건을 표현하는데 사용되는지 설명한다. 퍼지 Stochastic 현상[9]과 랜덤 변수들의 일반화를 수학적으로 표현하기 위해 본 논문에서는 퍼지성과 랜덤성이 동시에 통합된 불확실한 정보를 퍼지-랜덤 변수를 사용하여 표현한다. 결과적으로 이러한 퍼지-랜덤 변수들을 사용함으로써, 실시간 제어 시스템의 포괄적이고 유동적인 상태를 표현하고, 사건들의 퍼지성과 랜덤성을 통합하여 나타냄으로써, 복잡한 시스템 특성을 간략화 한다. 퍼지-랜덤 변수는 (1)과 같이 정의될 수 있다.

정의 : (Ω, A, P) 의 확률 공간에서, $\tilde{X}: \Omega \rightarrow F_0(R)$ 의 대응을 확률 공간에서의 퍼지 랜덤 변수로 정의한다. 임의의 어떤 $\alpha \in (0, 1)$ 와 $\omega \in \Omega$ 에 대해서,

$$\tilde{X}_\alpha(\omega) = \{x \mid x \in R, \tilde{X}(\omega)(x) \geq \alpha\} = [X_\alpha^-, X_\alpha^+], \quad (1)$$

여기서 \tilde{X}_α 는 랜덤 구간이며, X_α^- 와 X_α^+ 는 두 개의 랜덤 변수이다. 이 논문에서 시스템 상태에 의해 결정되는 특정한 이산 시간 영역 함수나 이산 비용함수를 다루기 때문에 [8]에서와 같이 α -레벨의 개념을 적용하지 않고, 또한 X 의 영역을 비용 영역으로 간주하였다.

퍼지-랜덤 변수는 ω 가 대응되는 실수가 구간으로 존재한다는 측면에서 랜덤 변수와 특징적으로 다르다. 즉 퍼지-랜덤 변수와 ω 의 관계가 일대일로 대응되는 것이 아니고, 여러 ω 들이 같은 실수 구간을 공유하며, 그들의 관계는 소속도로써 특징화 된다. 이제, 퍼지-랜덤 변수들의 확

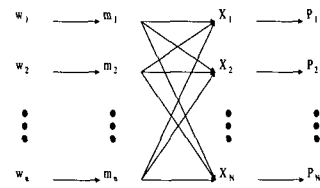


그림 1. 이산 퍼지-랜덤 변수들과 각각의 요소들, 소속도 및 확률의 관계도.

Fig. 1. Relationships among discrete fuzzy-random variables, the elements, the membership functions, and the probabilities.

률을 (i) w 가 이산이고 X 가 이산일 경우와 (ii) w 가 이산이고 X 가 연속인 경우에 대해서 정의하겠다. 그리고, ω 와 X 가 이산적인 값을 갖는 경우, ω_i 와 X_j 는, 각각 ω 의 i 번째 요소와 실수축 위에 X 의 j 번째 요소를 의미하며 이러한 관계는 그림 1에 나타나 있다. 각각의 ω_i 는 역시 이산적인 값을 가지는 정규화된(normalized) 소속도 함수 m_i 를 가진다. 그림 2는 소속도 함수 m_i 를 표현한 것이다. 대부분의 상용 컴퓨터 제어 시스템들의 경우, 시스템의 대부분 동작들은 명백하게 이산 샘플링 시간을 기반으로 하는 디지털 컴퓨터의 성능에 크게 의존한다. 이러한 실시간 제어 시스템에서, X 의 영역을 이산 시간 영역 t 로 간주하며, 이때, X_i 는 시스템의 i 번째 샘플링 시간을 의미하게 된다.

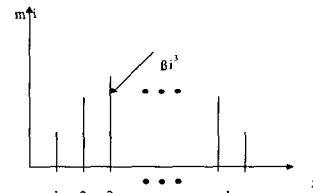


그림 2. 소속도 함수 m_i .

Fig. 2. The membership function m_i .

또한 실제의 시스템을 고려할 때, 유한한 시간 구간만을 대상으로 문제 전개를 하는 것은 합리적인 접근방식이다. 실제 시스템에서 여러 가지 고장들이 유발하는 시스템 상태들은 각각 다양한 값을 가지는 비용을 초래하게 된다. 그러므로, 이러한 경우에 요소고장 등의 사건들과 밀접히 연관된 응용 시스템 상태와 관련하여 적절하게 임의의 큰 수 N 까지 비용변수 X 의 영역을 제한한다고 가정할 수 있으므로, X_i 는 $i=1, \dots, N$ 에서 존재한다고 여겨진다. 이제, 위의 경우들에 대하여 퍼지-랜덤 변수들의 확률 함수 $P(X_i)$ 를 (2)로 정의한다.

$$P(X_i) = \sum_{j=1}^n P_j \beta_i^j \quad \text{for } i=1, \dots, N \quad (2)$$

여기서, $P(X_i)$ 는 퍼지-랜덤 변수 \tilde{X} 가 실수값 X_i 에 속할 확률이고, P_j 는 ω 가 ω_j 에 속할 확률이다. 또한, 모든

i 에 대하여 $\sum_{i=1}^N \beta_i^i = 1$ 와 $\sum_{i=1}^n P_i = 1$ 의 관계식이 성립한다. (2)를 행렬형태로 표현하기 위해, 퍼지-랜덤 변수 벡터, 표본 요소 벡터를 각각 $\mathbf{P}_x = [P(X_1), \dots, P(X_N)]$ 와 $\mathbf{P}_w = [P_1, \dots, P_n]$ 로 정의하면 (2)는 (3)과 같이 재정돈될 수 있다.

$$\mathbf{P}_x = \mathbf{P}_w \mathbf{M} \quad (3)$$

여기서, $\mathbf{P}_x \in R^{1 \times N}$, $\mathbf{P}_w \in R^{1 \times n}$ 이고 \mathbf{M} 은 다음과 같은 소속도값 행렬로 구성되어 있다.

$$\begin{bmatrix} \beta_1^1 & \beta_1^2 & \dots & \beta_1^N \\ \beta_2^1 & \beta_2^2 & \dots & \beta_2^N \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \beta_n^1 & \beta_n^2 & \dots & \beta_n^N \end{bmatrix}$$

그러므로, $\bar{X} \leq X_k$ 를 의미하는 확률은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} P(\bar{X} \leq X_k) &= P(X_1) + P(X_2) + \dots + P(X_k) \\ &= \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^n P_i \beta_j^i \end{aligned} \quad (4)$$

이제 X 가 연속적인 값을 가지는 경우도 위와 유사하게 확률 분포함수를 유도할 수 있다.

결론적으로 $\bar{X} = x$ 인 확률은 다음과 같이 계산된다.

$$P(\bar{X} = x) = \sum_{i=1}^n P_i m_i(x) \quad \text{for } x \in [0, \infty), \quad (5)$$

여기서, $m_i(x)$ 는 x 가 i 번째 표본요소에 소속되는 소속도의 값을 의미하며, $\sum_{i=1}^n P_i = 1$, $\int_0^\infty m_i(x) dx = 1$ 을 만족한다. 만일 $G_i(x) = \int_0^x m_i(t) dt$ 와 같이 정의한다면,

$$P(\bar{X} \leq x) = \int_0^x P(\bar{X} = t) dt = \sum_{i=1}^n P_i G_i(x). \quad (6)$$

앞에서 정의된 퍼지-랜덤 변수들에 의해 적절히 변형된 시간상태 오토마타 형태를 이용하여 실시간 제어 시스템을 DES 모델링한다. 우선 상태 오토마타는 다음과 같은 7가지 기본요소로 구성된다.

$$(E, S, \Gamma, f, s_0, m_i).$$

여기서, $E, S, \Gamma(s), f, s_0$ 와 m_i 는 각각 가산 사건 집합, 상태 공간, $s \in S$ 를 만족하는 s 에 대해 실현 가능한 사건 집합, 상태전이 함수, 초기 상태 및 i 번째 사건 요소 ω 에 대한 소속도 함수를 의미한다. (4)를 사용하여 다음과 같이 고장과 데드라인 정보를 포함한 사건들을 포함한 유동 시스템을 표현하는 DES 모델을 제시할 수 있다. 상태들은 대략적으로 정상 상태 S_0 , 제어기 고장상태 S_1 , 시스템 고장상태 S_2 로 분류되어 구성되며, 사건 집합 E 는 고장 발생사건 ω_0 와 고장 회복 ω_1 , 데드라인 초과 ω_2 와 각각 사건 $\omega_0, \omega_1, \omega_2$ 에 대한 소속도 함수들은 $m_0(x), m_1(x),$

$m_2(x)$ 로 각각 정의된다. 또한 각각의 실현가능한 사건 집합과 상태 전이 함수는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma(S_0) &= \{ \omega_0 \}, f(S_0, \omega_0) = S_1, \\ \Gamma(S_1) &= \{ \omega_1, \omega_2 \}, f(S_1, \omega_1) = S_0, \\ & f(S_1, \omega_2) = S_2, \Gamma(S_2) = \emptyset. \end{aligned}$$

이러한 시스템의 상태전이도는 그림 3과 같이 나타낼 수 있다. 이렇게 단순화된 모델을 기반으로 (4)와 소속도값 행렬 \mathbf{M} 을 결정함으로써 결과적으로 비용변수인 X_i 의 확률을 용이하게 계산할 수 있다.

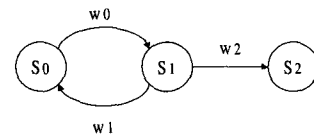


그림 3. 고장과 데드라인을 표현한 실시간 제어 시스템의 상태 전이도.

Fig. 3. State-transition diagram for a real-time system with controller upsets and the deadlines.

III. 보상값(reward) 구조의 정의 및 실시간 제어 시스템의 성능 분석

다른 여타의 상용 시스템들과 차별화될 수 있는 실시간 제어 시스템의 속성은 엄정한 시간제한성과 고장 발생시의 현저한 성능 저하 및 커다란 경제적 손실 등으로 특성화 될 수 있다[10,11]. 기존의 연구에서 고장과 회복을 무시한 성능 모델들은 단지 작업을 완수하는 능력만을 고려해온 것이 대부분이다. 그러나, 본 논문에서는 앞에서 언급한 고장 발생과 시간 지연 효과를 반영하는 이산사건시스템으로 시스템을 모델링하였다. 그러므로 성능 지수는 복잡한 반도체 제작 공정에서 발생할 수 있는 고장의 발생이나 데드라인 초과 등의 사건의 특성을 포함해야만 하며, 사건의 모호함을 표현하고, 비용 효과를 전체 시스템의 성능에 반영하기 위해서 퍼지-랜덤 변수를 사용하는 것이 효과적인 접근방식이다. 또한 시스템의 성능을 유연하게 평가하기 위해, 비용 변수 확률을 보상값 구조로 간주하는 시스템의 보상값을 구축된 모델에 도입하였다. 결과적으로 보상값이 시스템 상태변화를 여러 가지 다른 보상비로서 시스템 특성을 더 잘 표현할 수 있다. 제시된 모델에서 시스템 구조의 유동성과 주변 환경의 영향을 반영하는 성능 지수는 비용 변수의 확률과 보상값의 곱을 더한 값으로 다음과 같이 정의된다.

$$P_{sys} = \sum_{i=1}^N r_i P(X_i) \quad (7)$$

여기서, $P_{sys}, r_i, P(X_i)$ 는 각각 시스템의 성능지수, X_i 라는 비용 변수에 관련된 보상비(reward rate)와 X_i 비용 변수의 확률이다. 또한 \mathbf{R} 을 보상비 벡터로 정의하면, (2)와 (3)에서 정의된 $\mathbf{P}_x, \mathbf{P}_w$ 와 \mathbf{M} 으로 다음과 같은 행렬로

표현된다.

$$P_{sys} = P_x R = P_w M R \tag{8}$$

여기서, $P_x \in R^{1 \times N}$, $P_w \in R^{1 \times n}$, $R = [r_1, \dots, r_N]^T$ 이다.

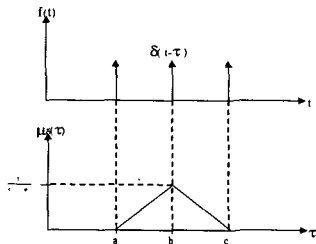


그림 4. 데드라인 사건을 퍼지-랜덤화한 경우의 확률 밀도함수 및 소속도 함수의 관계.

Fig. 4. One example of the fuzzy-random variable describing the deadline event.

IV. 퍼지-랜덤 변수에 의해 표현된 경성 데드라인

지금까지 경성(hard) 데드라인을 결정적인 값으로만 간주해서 시스템 모델링에 사용하였다. 하지만 실제의 시스템에서 데드라인은 시스템이 수행중인 작업의 수와 종류에 기본적으로 의존하기 때문에 고정된 값이 아니다. 또한 같은 작업이 연속적으로 수행된다고 하더라도, 시스템 및 작업 그 자체가 가지고 있는 복잡성과 모호성에서 비롯된 랜덤 환경에 의한 불확실성을 데드라인은 가지고 있다. 이러한 모호성을 퍼지화하여 표현하고 일례로 데드라인 사건이 정규 삼각함수를 소속도 함수로 가지는 랜덤 변수라고 가정한다. 데드라인 사건의 확률밀도함수(pdf)는 델타 함수이며, 사건 발생시간 τ 는 모호성을 지니며, 그 확률밀도함수는 다음과 같다.

$$f(t) = \delta(t - \tau),$$

여기서 τ 는 음이 아닌 퍼지 변수이다. $f(t)$ 와 소속도 함수 $\mu(t)$ 의 관계는 그림 4를 통해 관찰할 수 있다.

1. Path-Space 기법을 통한 시스템 신뢰도의 경계치 유도

그림 3에서 $f(t)$, $g(t)$, 그리고 $d(t)$ 는 제어기 고장의 Interarrival 시간과 회복시간 그리고 데드라인을 경과할 수 있는 시간들을 나타내는 확률밀도함수라 정의할 수 있다. 만약 $F(t)$, $G(t)$, $D(t)$ 가 $f(t)$, $g(t)$, $d(t)$ 의 Cumulative 확률분포(distribution)함수를 나타내고 $f_{ij}(t)$ 가 상태 S_i 에서 S_j 로 천이될 때의 확률밀도함수로 정의된다면, 다음과 같은 계산결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} f_{01}(t) &= f(t), & f_{10}(t) &= g(t)[1 - D(t)], \\ f_{12}(t) &= d(t)[1 - G(t)] \end{aligned} \tag{9}$$

여기서 $D(t)$ 는 데드라인이 τ 로 실험 및 해석적 방법에 의해 측정 또는 유도되었다면 $D(t)$ 는 아래와 같이 계산되어진다.

$$D(t) = \begin{cases} 0, & 0 \leq t < \tau \\ 1, & t \geq \tau \end{cases} \tag{10}$$

$D(t)$ 를 대입해서 얻은 회귀적인 적분 방정식을 Chapman-Kolmogorov 방정식[12] 및 $P_{22}(T-x) = 1$ 과 $f_{02}(t) = 0$ 를 적용하면 (11)과 같이 단순화 될 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{02}(T) &= \int_0^T f_{01}(x)P_{12}(T-x) dx, \\ P_{12}(T) &= \int_0^T f_{10}(x)P_{02}(T-x) dx + \int_0^T f_{12}(x) dx \end{aligned} \tag{11}$$

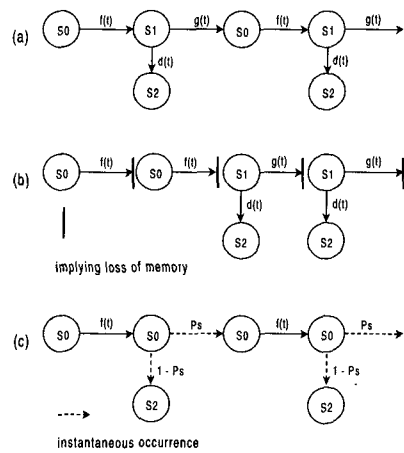


그림 5. (a) 상태 천이, (b) Semi-Markov 모델에 의해 재정리된 상태 천이, (c) Instantaneous coverage에 의해 근사된 상태 천이.

Fig. 5. (a) Transitions ordered originally, (b) Transition reordered using the semi-Markov models, (c) Transitions approximated by instantaneous coverage.

위 식에서 $P_{02}(T)$ 를 계산하기 위해 $P_{12}(T)$ 를 대입하면, 반복적으로 식의 대입을 요구하게 되고, 적분횟수의 증가로 인해 실질적인 계산이 불가능하게 된다. Markov 모델에서 모든 상태는 이전의 모든 상태에 비의존적이면서, 바로 이전 상태 및 그 때의 사건 발생 종류에만 의존하므로, 그림 5에서 처럼 상태 시퀀스에서 각 상태들의 배열순서를 변경할 수가 있다. 이렇게 이산사건에 발생 시퀀스에 의한 시스템 상태 시퀀스를 모두 배열한 Path를 중심으로 상태 확률을 구하는 방법이 Path-Space 기법이다[13,14]. 이러한 상태 확률의 정확한 값을 유도하기 위해선 Path-Space 기법 또한 무한히 많은 적분을 해야하는 어려움이 있으나 Markov Process의 개념[15]에 의한 Path 상에서의 순서 변동 및 적분 구간 변경을 통해 시스템이 임의 시간 T (mission time)안에 고장을 일으켜 전체 시스템 고장으로 전이되는 확률의 상위 경계값(UB; Upper Bound) 및 하위 경계값(LB; Lower Bound)의 유도할 수 있다. 이러한 방법을 통해 유도된 상·하위의 경계값들의 차이가 극히 미소하다면 정확한 값의 위치 구간을 쉽게 추정할 수 있다. 결국 임의의 시간 T 까지 시스템고장이 일어날 확률은 상

태 및 Path간의 비의존성에 의해서 시스템고장 상태로 직접적으로 이어지는(흡수되는) 모든 Path들의 확률의 합과 같다. P_n 이 n 번째 상태간의 루프를 경유한 이후에 시스템 고장 상태로 천이될 확률이라고 정의한다면

$$P_0 = \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^{T-t_1} f_{12}(t_2) dt_2 dt_1$$

$$\vdots$$

$$P_n = \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^{T-t_1} f_{10}(t_2) \int_0^{T-t_1-t_2} f_{01}(t_3) \dots$$

$$\int_0^{T-t_1-t_2-t_3} f_{10}(t_4) \int_0^{T-t_1-\dots-t_{2n-2}} f_{01}(t_{2n-1}) *$$

$$\int_0^{T-t_1-\dots-t_{2n-1}} f_{12}(t_{2n}) dt_{2n} dt_{2n-1} \dots dt_2 dt_1$$

와 같이 된다. 또한 이 식을 전체시간에 대한 상태의 독립성을 바탕으로 식을 재배열하면 일반적인 n에 대한 P_n 은 적분순서를 재배열하는 결과로 인해 다음과 같은 동일한 계산식으로 나타내어진다.

$$P_n = \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^{T-t_1} f_{01}(t_2) \dots$$

$$\int_0^{T-t_1-\dots-t_{n-1}} f_{01}(t_n) \int_0^{T-t_1-\dots-t_{2n-2}} f_{10}(t_{2n-1}) *$$

$$\int_0^{T-t_1-\dots-t_{2n-1} - f_{12}(t_{2n})} dt_{2n} \dots dt_2 dt_1.$$

위에서 얻어진 P_n 에서 적분 영역을 변경하면 경계치 유도과정은 다음과 같은 부등식으로 표현할 수 있다.

$$P_0 \leq \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^\infty f_{12}(t_2) dt_2 dt_1$$

$$\vdots$$

$$P_n \leq \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^{T-t_1} f_{01}(t_2) \dots \int_0^\infty f_{01}(t_n)$$

$$\int_0^\infty f_{10}(t_{2n-1}) * \int_0^\infty f_{12}(t_{2n}) dt_{2n} \dots dt_2 dt_1$$

$$= \int_0^T f_{01}(t_1) \int_0^{T-t_1} f_{01}(t_2) \dots$$

$$\int_0^{T-t_1-\dots-t_{n-1}} f_{01}(t_n) dt_n \dots dt_2 dt_1 * \left(\int_0^\infty f_{10}(x) dx \right)^{n-1}$$

$$\left(\int_0^\infty f_{12}(x) dx \right)$$

$$= \Pr[k \leq n | T][1 - G(\tau)] G^{n-1}(\tau)$$

여기서 $\Pr[k \leq n | T]$ 는 제어기가 T시간 동안에 최소한 n 번 실패할 확률을 의미하며 $G(\tau)$ 는 데드라인 이내에 제어 기고장이 회복될 확률값이다. 그러므로, 전체 시스템고장의 상위 경계치(UB)는 다음과 같이 유도된다.

$$UB = [1 - G(\tau)] \sum_{n=1}^N \Pr[k \leq n | T] G^{n-1}(\tau) \quad (12)$$

이와 유사한 과정을 거쳐 적분구간의 변경을 의미하는 그림 6-(c)를 이용하여 하위 경계치를 유도하면,

$$P_0 \geq \int_0^{T-\tau} f_{01}(t_1) \int_0^\tau f_{12}(t_2) dt_2 dt_1$$

$$P_n \geq \int_0^{T-n\tau} f_{01}(t_1) \int_0^{T-n\tau-t_1} f_{01}(t_2) \dots \int_0^{T-n\tau-t_1-\dots-t_{n-1}} f_{01}(t_n) *$$

$$\int_0^\tau f_{10}(t_{2n-1}) \int_0^\tau f_{12}(t_{2n}) dt_{2n} \dots dt_2 dt_1$$

$$= \int_0^{T-n\tau} f_{01}(t_1) \int_0^{T-n\tau-t_1} f_{01}(t_2) \dots \int_0^{T-t_1-\dots-t_{n-1}} f_{01}(t_n) dt_n \dots dt_2 dt_1 *$$

$$\left(\int_0^\tau f_{10}(x) dx \right)^{n-1} \left(\int_0^\tau f_{12}(x) dx \right)$$

$$= \Pr[k \leq n | T - n\tau][1 - G(\tau)] G^{n-1}(\tau)$$

그러므로 시스템고장 확률의 하위 경계치(LB)는 다음과 같이 유도된다.

$$LB = [1 - G(\tau)] \sum_{n=1}^N \Pr[k \leq n | T - n\tau] G^{n-1}(\tau) \quad (13)$$

2. 퍼지-랜덤 변수를 적용한 확장된 시스템 신뢰도 모델
퍼지-랜덤 변수에 의해 확장된 신뢰도 모델을 만들기 위해, 데드라인 사건을 퍼지-랜덤 변수로 가정할 수 있다. 즉, 데드라인 τ 가 상수가 아니라 소속도 함수 $\mu_{(\tau)}(y)$ 를 가진다고 가정하자. 이러한 가정 하에서 시스템 회복 성공과 회복 실패를 나타내는 퍼지-랜덤 벡터 $G_\tau(y)$ 와 $\bar{G}_\tau(y)$ 를 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$G_\tau(y) = \mu_{\tau}(y) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx \quad (14)$$

$$\bar{G}_\tau(y) = 1 - G_\tau(y) = \mu_{\tau}(y) \int_0^y d(x) \bar{G}(x) dx$$

예를 들어, 데드라인 사건 τ 가 정규화된 삼각함수를 그 소속함수로 가진다고 가정하자. 즉,

$$\mu_{(\tau)}(y) = \begin{cases} \frac{2}{c-a} \left(\frac{y-a}{b-a} \right) & \text{for } a \leq y \leq b \\ \frac{2}{c-a} \left(\frac{c-y}{c-b} \right) & \text{for } b \leq y \leq c \end{cases}$$

와 같은 소속함수의 경우, (여기서 a, b, c 는 $a \leq b \leq c$ 를 만족하는 음이 아닌 실수라고 가정함) $G_\tau(y)$ 는 다음과 같이 유도되고,

$$G_\tau(y) = \begin{cases} \frac{2}{c-a} \left(\frac{y-a}{b-a} \right) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx & \text{for } a \leq y \leq b \\ \frac{2}{c-a} \left(\frac{c-y}{c-b} \right) \int_0^y g(x) \bar{D}(x) dx & \text{for } b \leq y \leq c \end{cases} \quad (15)$$

이를 이용하여, 확장된 신뢰도의 상하위 경계치를 (16)과 같이 계산할 수 있다.

$$UB = [1 - G_\tau] \sum_{n=1}^N \Pr[k \leq n | T] G_\tau^{n-1} \quad (16)$$

$$LB = [1 - G_\tau] \sum_{n=1}^N \Pr[k \leq n | T - n\tau] G_\tau^{n-1}$$

퍼지-랜덤 변수에 의해 확장된 신뢰도에 대해 고려해 본다면, 상하위 경계치 UB와 LB는 정규 소속도 함수에 의해 그 모호성이 표현되었기 때문에, y에 대한 함수 형태로 표현된다. 또한 상대적 차이비율(Relative Ratio Difference, RRD)는 예상대로 그다지 큰 차이를 보이지 않음을 관찰할 수 있고, 따라서 이러한 구간 신뢰도 값은 유효함을 알 수 있다.

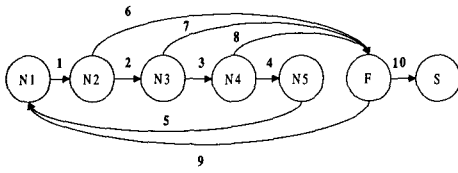


그림 6. RTP 시스템의 상태천이도.
Fig. 6. State-transition diagram of a simple RTP.

V. 수치 예제

제안된 성능 측정법을 사용하는 방법 및 그 유효성을 설명하기 위해, 다음의 수치 예제를 살펴본다. RTP는 반도체 생산공정을 위한 유연 생산 시스템의 구축에 이상적인 기기중 하나로서 웨이퍼를 처리하기 위해서 필요한 공정들 즉, 담금질, 클리닝, 산화, 화학적 증기 증착, 질화, 에피성장 등의 다양한 응용작업을 수행할 수 있는 웨이퍼 가공기이다. 그러나 기존의 RTP 모델링기법은 실제 반도체 공정에서 적절한 확률분포를 갖고 일어나는 각종 기기의 오동작이나 고장, Recipe의 부적합, 치명적인 고장 등에 대해서는 경제적이고 구체적인 모델링이 이루어지고 있지 않다. 실제 RTP시스템의 제어과정 중에서 고장이 발생하면 고장 진단 및 회복요소기법들을 사용하여 자동적인 고장 감지와 제거가 순차적으로 이루어진다. 그러나, 실시간 시스템의 관점에서 데드라인내에 고장에서 시스템이 회복되지 못하면 전체 시스템은 다운되거나 적어도 시스템의 성능에 심각한 피해를 입히게 된다. 이러한 시스템 모델의 간단한 상태 전이도와 사건 및 상태설명은 각각 그림 6과 표 1에 나타나 있다. 이 시스템의 사건요소 벡터 Pw 는 그림 6에서 간단히 모델링한 것에서 각 사건들의 확률을 DTMC(Discrete Time Markov Chain)를 통해 구하면 $Pw=[0.1692, 0.1598, 0.1316, 0.1410, 0.1504, 0.0188, 0.0376, 0.0414, 0.1128, 0.0376]$ 과 같으며, 또한 소속도 행렬 M 은 각각의 사건요소벡터에 대응하여 계산하기 위해서 가장 대표적으로 사용되는 소속도함수를 적용된다는 가정하에 아래와 같이 네가지의 소속도함수를 사용하였다. 또한

표 1. 공정순서 모델링.
Table 1. Specification of RTP events.

n step	상태
1	Wafer in and door close
2	Purge
3	Lamp power on
4	Purge
5	Stand by
6	Purge system malfunction(gas leak, pyrometer fault)
7	Lamp malfunction
8	Cooling system malfunction
9	Repair and reset
10	System down

표 2. 여러 가지 소속도 함수에 대한 시스템 성능.

Table 2. Performance of the presented system with several membership functions.

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
P_{sys} (보상레벨1)	0.5001	0.6283	0.6667	0.2845
P_{sys} (보상레벨2)	0.5001	0.3718	0.3334	0.7156
P_{sys} (보상레벨3)	0.6321	0.5457	0.5162	0.7637

한 보상값 벡터 R 도 선형적으로 증가하는 경우(보상레벨 1)와 감소하는 경우(보상레벨2)와 지수적으로 감소하는 경우(보상레벨3)에 대하여 가정하였다. 계산된 성능의 결과는 표2에 나타나 있다.

- Case 1 : Uniform 소속함수인 경우,
- Case 2 : Gaussian 소속함수인 경우,
- Case 3 : Triangular 소속함수인 경우,
- Case 4 : 비대칭 polynomial 소속함수인 경우,

간단한 위의 예를 통해 계산된 성능크기의 순위가 보상레벨의 변화에 따라 다르다는 것을 쉽게 알 수 있다. 즉, 전체 시스템의 성능이 비용 변수의 분포뿐 아니라 그것의 보상값에도 의존한다는 것을 의미한다.

이제, Path-Space 기법을 통해 확장된 시스템 신뢰도의 상하위 경계치를 계산하는 수치 예제를 고려해 본다. 첫번째 예로, 자동화된 반도체생산 시스템에서 RTP제어기에 의해 관측되고 운영되는 생산라인이 있고 이 라인의 제어기가 10일의 평균과 회복 확률이 0.95인 지수 분포의 실패 확률 분포를 가지고 있다고 하자. 이 시스템의 제어기가 고장 발생 200일의 평균과 회복 확률이 0.99인 지수 분포의 실패 확률 분포를 가지고 있다고 하자. (즉 $G(\tau): 0.95, 1/\lambda: 10$ 일, $T: 1$ 일. $\tau: 15$ 분이며 $a=13, b=15, c=17$ 이다.) 그러면, 이러한 경우 제안된 계산기법에 의해 유도된 전체 시스템고장 확률의 상위 경계치는 0.07342이며 하위 경계치는 0.07266으로 계산된다. 이때의 RRD는 0.01026로 구해진 경계치의 엄정함을 보여줄 만큼 충분히 작다. 관련된 수치 결과는 표 3 및 그림 7. (a)에 나타나 있다. 두번째로 아주 짧은 시간의 주기적인 행동이 필요한 경우의 RTP의 고장제어기를 고려해 보자. 이러한 시스템은 일반적으로

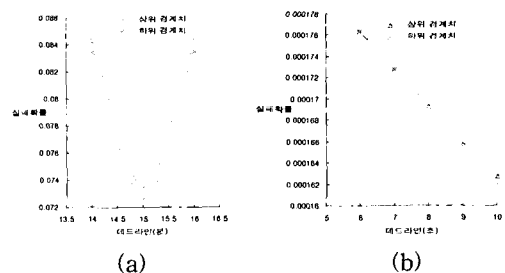


그림 7. (a) 생산라인 신뢰도의 상하위 경계치, (b) RTP의 고장제어기신뢰도의 상하위 경계치.
Fig. 7. (a) UB and LB of a assembly line case, (b) UB and LB of a assembly line case.

엄정하고 짧은 데드라인을 가지며, 제어기는 고장포용을 위해 상당히 많은 여분을 지니도록 설계된다. 제어기교장의 평균 도착시간이 10^8 시간이고, $G(\tau)$ 는 0.99, 또한 τ 를 10초로 가정하자. 그러면 1시간동안 최대 5번의 제어기의 실패를 고려하여, 상위 경계치와 하위 경계치를 구하면, 0.00016217와 0.00016201로 얻어지고 RRD는 0.00055552가 되며 이의 엄정함은 앞의 예와 비서 더욱 작은 τ 값 때문에 상당히 개선된 결과로 나타난다. 이런 고신뢰도 시스템의 경우 위에서 구해진 상·하위 경계치들이 충분히 엄정하다는 것이 표 3 및 그림 7. (b)을 통해 입증된다.

VI. 결론

실시간 시스템은 고장 및 시간 지연요소에 의한 시스템 상태의 변화가 크며, 그렇기 때문에 이런 시스템 모델링을 위해서는 많은 요소들을 고려하여 반영할 수 있는 유연한 성능 및 신뢰도에 대한 평가 방법이 필요하다. 이러한 유연한 평가방법제시를 위해, 본 논문에서 퍼지-랜덤 변수를 사용하여 DES 모델을 만들었으며, 실시간 시스템의 관점에서 반도체 생산 장비인 RTP의 성능 및 신뢰도를 구체적으로 평가할 수 있는 기법을 제시하였다. 또한 RTP 시스템의 경우에 대하여, 간단하면서도 대표적인 시스템을 모델링하여 시스템 성능 및 신뢰도를 수치적으로 계산하였다. 확장된 Path-Space 기법에 의해 구해진 식을 수치해석적으로 계산하기는 매우 용이하였고, 경계치의 상대 비율 차이가 엄정한지를 입증하였다.

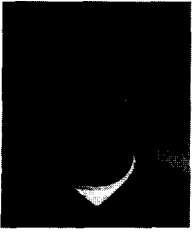
표 3. 신뢰도 경계치.

Table 3. Both bounds and the RRD of reliability models.

	UB	LB	RRD
$\tau = 14$ 분인 경우	0.08435	0.08350	0.01009
$\tau = 15$ 분인 경우	0.07342	0.07266	0.01026
$\tau = 16$ 분인 경우	0.08435	0.08350	0.01009
	UB	LB	RRD
$\tau = 6$ 초인 경우	0.00017642	0.00017632	0.00055551
$\tau = 7$ 초인 경우	0.00017285	0.00017276	0.00055551
$\tau = 8$ 초인 경우	0.00016929	0.00016920	0.00055551
$\tau = 9$ 초인 경우	0.00016573	0.00016564	0.00055552
$\tau = 10$ 초인 경우	0.00016217	0.00016201	0.00055552

참고문헌

- [1] C. Schaper and K. Sarawat, "Control of MMST RTP: Repeatability, uniformity and integration for flexible manufacturing," *IEEE Trans. on Semiconduct. Manufact.*, vol. 7, pp. 202-218, May/Dec. 1994.
- [2] A. Theodoropoulou and E. Zafiriou, "Model reduction for optimization of rapid thermal chemical vapor deposition systems," *IEEE Trans. on Semiconduct. Manufact.*, vol. 11, pp. 85-98, Feb./Dec. 1994.
- [3] K. G. Shin, C. M. Krishna, and Y.-H. Lee, "A unified method for evaluating real-time computer controllers and its application," *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 30, 1985.
- [4] T. Chou, and J. Abraham, "Performance/availability model of shared resource multiprocessors," *IEEE Trans. on Reliability*, vol. 29, 1980.
- [5] K. Shin and H. Kim, "Derivation and application of hard deadlines for real-time control systems," *IEEE Trans. on Systems, Man, & Cybernetics*, vol. 22, no. 6, pp. 1403-1413, 1992.
- [6] H. Kwakernaak, "Fuzzy random variables: definitions and theorems," *Inform. Sci.*, vol. 15, 1978.
- [7] M. Puri and D. Ralescu, "Fuzzy random variables," *J. Math. Anal. Appl.*, vol. 114, 1986.
- [8] H. Kim, A. White, and K. Shin, "Reliability modeling of real-time systems with hard deadlines", *FTCS-28*, pp. 304-313, 1998.
- [9] W. Guanyuan and Z. Yue, "The theory of fuzzy stochastic processes," *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 51, 1992.
- [10] M. Beaudry, "Performance reliability for computer systems," *IEEE Trans. Computers*, vol. C-27, pp. 540-547, 1978.
- [11] K. Shin and C. Krishna, "New performance measures for real-time computer control and their applications," *Control and Dynamic Systems*, 1990.
- [12] S. Karlin and H. Taylor, "A first course in stochastic processes," *Academic Press, New York*, 1975.
- [13] H. Kim and K. Shin "Reliability modeling with deadline information in real-time systems," *IEEE 1997 (18th Annual) Aerospace Conference*.
- [14] A. White, "Reliability estimation for reconfigurable systems with fast recovery," *Microelectron. Reliab.*, vol. 26, no. 6, 1986.
- [15] W. Feller, "On semi-markov processes," *Proc. National Academy of Sciences*, vol. 51, pp. 653-659, 1964.



민 병 조

1998년 연세대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 연세대학교 전기컴퓨터공학과 석사 과정. 관심분야는 실시간 시스템, 성능 및 신뢰도 평가.



이 석 주

1991년 연세대 전기공학과 졸업. 동대학원 석사(1993), 동대학 박사(1999). 1999년~현재 한국과학기술원 지능제어연구센터 박사후 연구원. 관심분야는 지능제어, 시스템 모델링 및 제어, 반도체 생산 시스템.



김 학 배

1988년 서울대 전자공학과 졸업. 미국 미시간대 대학원 전기공학과(EECS) 석사, 동대학원 박사(1994). National Research Council(NRC) Research Associate at NASA Langley Research Center 1996년~현재 연세대학교 전기컴퓨터공학과 교수. 관심분야는 실시간 시스템, 실시간 정보 처리.