

반도체 생산시스템의 공정운영 분석 및 관리제어

조광현, 임종태

한국과학기술원 전기및전자공학과

본 논고에서는 기존의 연속변수영역에서 다루기 어려운 반도체 생산시스템을 대상으로 이산사건 시스템적 접근방법을 통한 동적특성의 분석 및 이를 이용한 내고장성 관리제어와 고장진단 기법 등을 소개한다. 특히, 시스템 운영시 발생가능한 고장을 fault와 failure로 정량적인 구분을 해내고 이를 기반으로 고장에 대한 체계적인 대처방안을 제안한다. 그리고 제안된 이론체계에 대해서 플라즈마 식각공정의 예를 통해 그 논리적 타당성을 검증해 본다.

1. 서론

반도체 생산시스템과 같이 복잡한 첨단시스템에서 요구되는 고신뢰도와 고성능성을 만족시키기 위해서는 불시고장으로 인한 정지시간을 최소화하여야 하며, 일시적인 고장 발생시 지속적인 시스템 운전을 할 수 있도록 내고장성 시스템을 구축해야 한다. 고장진단 기법에 관한 연구는 여러문헌[1]-[3]등에서 고찰되어 왔으나 반도체 생산시스템과 같은 복잡한 시스템의 경우 동적특성의 해석이 난해하기 때문에 이를 위한 효율적인 고장진단 기법은 정립되어 있지 않다. 이에 본 논고에서는 복잡한 동적특성을 지닌 반도체 생산시스템에 적합한 이산사건 모델 접근법을 통하여 정상상태와 고장상태를 포괄할 수 있는 모델링 및 해석기법을 정립하여 관측가능한 사건을 근거로 고장발생의 원인을 추론하고 이를 이용하여 고장진단 기법, 내고장성 관리제어기법 등을 개발하고자 한다.

제어이론이 창출된 이래로 고전제어에서 현대제어에 이르기까지 연구의 주된 대상이 되어온 시스템 영역은 뉴턴역학에 기초해 미분방정식 또는 차분방정식 등으로 모델링되는 연속변수 시스템(continuous variable dynamic system)들이었다. 이러한 시스템 부류에 대해서는 오랫동안 여러방면에 걸쳐 괄목할만한 발전을 이루어왔으며 또한 많은 표준화된 결과들이 도출되어 왔지만 현대에 이르러 등장하게 된 다양한 인공(man-made)시스템들의 제어와 자동화에 있어서는 또 다른 어려움에 직면하게 되었다. 이러한 어려움은 제어기 설계의 복잡도, 모델링의 불확실성 등의 문제 이외에도 시스템의 동적인 특성 자체에 근본적으로 기존

의 연속변수 시스템과는 다른 점이 있기 때문이었다. 이에 불규칙한 시간간격으로 발생하는 '사건(event)'에 의해 구동되는 동적인 특성을 모델링하고, 분석하고, 제어하기 위해 '이산사건 시스템(discrete event dynamic system)'이라는 새로운 시스템 부류를 생각하기에 이르렀다 [5], [6], [8]. 이러한 이산사건 시스템은, 자연발생적으로 사건의 발생과 그에 따른 '상태(state)'의 천이로 규정되는 동적특성을 지닌 현대의 인공시스템들 뿐만 아니라 대부분의 시스템에 있어서 추상화 단계(abstraction level)를 높여서 보았을 경우도 포함할 수 있으며, 대표적인 예로는 생산시스템, 컴퓨터 네트워크, 통신시스템, 트래픽 제어시스템 등이 있다. 근래에는 이러한 이산사건 시스템의 분석 및 제어를 위해 오토마타, 형식언어 이론 등을 통한 이산사건 모델링 및 이에 기반한 관리제어 이론이 세계적으로 각광받고 있고 많은 연구가 이루어지고 있다.

최근에 이와 같은 이산사건 모델에 근거한 고장진단 기법에 관한 연구가 진행되고는 있으나[4] 주로 고장 감지 및 원인추론 등에 관련된 부분적 결과가 도출되었을 뿐 고장분석, 진단, 내고장성 관리제어를 포함하는 총체적 이론체계는 정립되어 있지 않은 실정이다. 또한, 도출된 결과에 있어서도 아직은 간단한 시스템을 대상으로 하고 있어 결과가 미비한 상태이며 진단 절차에 따른 계산상의 복잡도가 해결되어야 할 과제로 남아 있다. 이에 본 논고에서는 그간의 연구결과를 토대로 고장대처에 대한 체계적 시스템 운영을 소개한다. 먼저 시스템 운영시 발생할 수 있는 이상현상(abnormal situation), 즉 '고장'을 그 발생한 시점으로부터 운전을 중지하지 않고도 원래의 제어목적 달성을 수 있는 경우인 'fault'와 완전한 시스템의 운전중지가 요구되는 경우인 'failure'로 그 정도에 따라 정량적으로 분류해 내고 이에 대처하기 위해 형식언어 이론을 이용한 체계적 고장분석 및 진단 알고리즘을 제안한다. 또한 이러한 시스템의 고장분석을 통해 얻은 정보로부터 시스템의 내고장성 여부를 판단하여 관리제어 이론에 기반한 내고장성 관리제어기의 설계에 대해 알아본다. 그리고 제안된 분석기법, 진단 알고리즘, 제어기법 등을 포괄하는 총체적 이론체계를 정립한다.

반도체 생산시스템은 그 동적특성이 난해하고 복잡하지만 어떤 시스템보다도 고신뢰도와 고성능이 요구되는 시스템이다. 본 논문에서는 우선적으로 VLSI 회로의 제작과정 중 여러공정에서 매우 핵심적인 역할을 하고 있는 플라즈마 식각장비[7]에 대해 이산사건 시스템으로 모델링하고, 개발된 고장분석, 진단, 제어기법 등의 적용을 통해 제안된 이론의 활용을 모색하여 본다.

2. 이산사건 모델 및 관리제어이론

현대에 등장한 많은 인공시스템들(man-made systems)은 그 동적특성상 고전적인 미분방정식 모델보다는 이산사건 모델(Discrete Event Model(DEM))[8]로 잘 대변되어진다. DEM은 시스템을 '상태변수'들과 그들 상호간의 천이, 즉 '사건(event)' 레벨에서 기술하므로 미분방정식 보다는 추상화된 개념적 모델이라고 할 수 있다. 본 논문의 연구에서는 여러 종류의 DEM들 가운데 시스템의 논리적인 동작 특성을 직관적으로 잘 나타낼 수 있는 오토마톤(automaton)을 이용한다. 제어대상 플랜트는 다음과 같은 오토마톤 G 로 표현될 수 있다.

$$G = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m)$$

여기서 Σ 는 모든 발생 가능한 사건들의 집합이고, Q 는 상태변수들의 집합, $q_0 \in Q$ 는 초기상태, $Q_m \subset Q$ 은 원하는 최종상태, 즉 표기상태들(marker states)의 집합이며 $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 상태변수들간의 천이함수로서 모든 Q 에 대해 Σ 의 부분집합만이 정의되어 있는 부분함수이다. 특히 Q 가 유한집합인 경우 위 오토마톤 G 를 Finite State Machine(FSM)이라고 부르며 각 상태변수를 노드(node)로 하고, 각 천이함수 δ 를 edge로 하는 천이도로 나타내어진다. 천이도에서는 일반적으로 초기상태를 들어가는 화살표로, 표기상태를 나오는 화살표로 표시한다. 집합 Σ 는 천이도상의 모든 edge 라벨들의 집합이다. Σ^* 를 집합 Σ 에 속한 사건들로 구성된 모든 유한 사건열(event sequence)들의 집합이라고 하자 (이때 빈 사건열은 ϵ 으로 표현한다). 그러면 δ 는 Σ^* 에 대해 다음과 같이 확장되어 정의될 수 있다.

$$\delta(\epsilon, q) := q, (\sigma \in \Sigma, s \in \Sigma^*) \quad \delta(s\sigma, q) := \delta(\sigma, \delta(s, q)).$$

이때 이러한 Σ^* 의 부분집합을 언어(language)라고 한다. 그러면 G 의 동적특성은 Σ^* 의 두 부분집합, $L(G)$ 와 $L_m(G)$ 로 특징지어질 수 있다. 여기서 $L(G)$ 는 $L(G) := \{s \mid s \in \Sigma^* \text{ 그리고 } \delta(s, q_0) \in Q\}$ 로 정의되고, 플랜트에서 발생가능한 모든 사건열들의 집합을 의미한다.

$$L_m(G) := \{s \mid s \in \Sigma^* \text{ 그리고 } \delta(s, q_0) \in Q_m\}$$

는 표기언어(marked language)로서 작업의 완성을 나타내는 사건열들의 집합이다.

시스템을 모델링하거나 분석, 합성시에 복잡성 때문에 시스템 전체를 한번에 고려하기보다는 각 부분에 대해 먼저 고려한 다음에 각 부분간의 상호관계를 고려하여 전체시스템에 대해 생각하는 것이 합리적이다. 각 부분모델들을 합성하여 전체모델을 구하는 과정은 다음의 병렬합성(parallel composition)[8]을 통해 이루어진다. 어떤 프로세스 P 에서 σ 란 사건이 발생했을 때 p 의 상태에서 p' 상태로의 상태 천이함수가 $\delta(\sigma, p) = p'$ 으로 정의되는 경우 $P: p \xrightarrow{\sigma} p'$ 라 쓰고, $\delta(\sigma, p)$ 가 정의되지 않는 경우 $P: p \xrightarrow{\sigma} \setminus$ 라 하자. $P \parallel_A Q$ 는 두 프로세스 P 와 Q 의 병렬합성을 나타내며 A 는 두 프로세스에서 동시에 발생가능한 사건들의 집합을 나타낸다. 두 프로세스의 병렬합성은 A 의 종류에 따라 몇가지로 분류되는데 본 논문에서는 다음과 같이 시스템에서 정의되는 모든 사건들이 각 부분 모델들에 있어서 비동기화 되어있는 경우를 가정하였다. 전체사건 ($A = \Sigma$)에 대해 비동기화 되어있는 경우의 합성모델은 사건 σ 가 두 모델 P 와 Q 중 적어도 한 모델에서 발생하는 경우

$$P: p \xrightarrow{\sigma} p' \vee Q: q \xrightarrow{\sigma} q' \Rightarrow P \parallel_{\Sigma} Q: (p, q) \xrightarrow{\sigma} (p', q')$$

로 정의되고, 각 모델의 현 상태에서 발생하는 사건이 없다면 정의되지 않는다. 본 연구에서는 반도체 생산 시스템에 대한 적용의 한 예로서 플라즈마 식각장비를 구성하고 있는 부분시스템들, 즉 압력 제어부, 밸브 제어부, 유체흐름 제어부에 대해 부분 이산사건 모델로부터 이와 같은 병렬합성법을 이용해 전체시스템에 대한 모델을 유도한다.

플랜트에서 발생할 수 있는 전체 사건집합(Σ)을 제어가능한 사건집합(Σ_c)과 제어불가능한 사건집합(Σ_{uc})으로 분류하여 관리제어를 적용한다. 제어가능한 사건이란 외부 제어입력을 통해 발생여부를 통제(enable 또는 disable)할 수 있는 사건이고 제어불가능한 사건이란 그렇지 못한 사건인데 항상 enable되어 있는 사건으로 간주된다. 관리제어기는 결국 플랜트가 생성하는 사건열을 관측하여 각 관찰시점에서 제어가능한 사건들을 통제하는 역할을 한다. 이렇게 제어가능한 사건들을 통제함으로써 관리제어기는 플랜트에서 발생가능한 언어들 가운데 제어목적에 부합되는 일부의 언어들만을 발생토록 하는 것이다. 이를 보다 체계적으로 기술하면 관리제어기 S 는 (S, ϕ) 로 표현되는데 S 는 플랜트 G 가 발생시키는 언어들을 인식(recognize)하는 오토마톤이며 ϕ 는 되먹임(feedback) 함수로서 사건집합과 S 의 상태변수집합으로부터 집합,

$\{1(enable), 0(disable)\}$ 로 대응시키는 함수이다. X 를 S 의 상태변수들의 집합이라면

$\phi: \Sigma \times X \rightarrow \{1, 0\}$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(\sigma, x) = \begin{cases} 1, & \text{if } \sigma \in \Sigma_{uc}, x \in X, \\ \{1, 0\}, & \text{if } \sigma \in \Sigma_c, x \in X. \end{cases}$$

오토마톤 S 는 G 의 동작을 추적하며 이를 제어한다. 즉, S 의 상태변수는 G 에 의해 발생하는 사건에 따라 천이되며, 또한 제어규칙 $\phi(\sigma, x)$ 는 G 의 각 상태에서 사건 σ 가 *disable* 또는 *enable* 될지를 결정하는 것이다. 주어진 플랜트가 관리제어기 $S = (S, \phi)$ 에 의해 제어될 때 전체 폐루프 시스템의 동작은 오토마톤 S/G 로 표현되며, 이로부터 생성되는 언어 $L(S/G)$ 는 G 와 S 모두에 공통이 되고 ϕ 에 의해 *enable*되는 사건열들만을 포함한다. $L_c(S/G)$ 는 제어되지 않은 플랜트가 생성가능한 표기언어들 가운데 제어 후에도 *enable* 상태로 남아있는 사건열들로 구성된 언어를 나타낸다. 즉,

$L_c(S/G) = L(S/G) \cap L_m(G)$ 이다. 그리고 전체 폐루프 시스템의 표기동작(marked behavior)은 $L_m(S/G)$ 로 표현되며 $L(S/G)$ 가운데 G 와 S 모두에 의해 표기된 언어들만을 포함한다.

3. 고장분석, 진단 및 내고장성 관리제어

3.1 고장분석

먼저 전체 시스템을 구성하고 있는 각 부분 시스템들에 대해 앞서 설명한 이산사건 모델 상에서 병렬합성법을 이용하여 전체 시스템에 대한 이산사건 모델을 구한다. 모델에는 시스템에서 발생할 수 있는 비정상적인 사건들이 특정 상태들에서 정의될 수 있는데, 이산사건 모델 상의 한 상태에서 하나의 비정상적인 사건이 발생하였을 경우에 그 사건 발생이후 원하는 최종상태로 가는 경로들을 조사하고 항상 그 경로가 보장되는 경우와 그렇지 않은 경우를 구분한다. 이러한 구분을 바탕으로 이산사건 모델 상에서 *fault*와 *failure*에 대한 정량적인 분류를 한다. 시스템에서 발생할 수 있는 원하지 않는 변화는 정상적인 동작모드 중에 발생하는 제어불가능하고 비정상적인 사건들의 집합으로 설명될 수 있다. Σ_{an} 을 비정상적인 사건들의 집합, Σ_n 을 정상적인 사건들의 집합이라고 정의하자. 집합 Σ_{an} 은 집합 Σ_{uc} , 즉 제어불가능한 사건들의 부분집합이고, 전체사건집합 Σ 는 $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc} = \Sigma_n \cup \Sigma_{an}$ 으로 나타낼 수 있다. 또한 표기상태는 시스템의 동작모드에 따라 $Q_m = Q_{m_1} \cup Q_{m_2} \cup \dots \cup Q_{m_k} = \bigcup_{i=1}^k Q_{m_i}$ 로 분리될 수 있다고 가정하자.

먼저, 고장을 사건이 일어날 당시의 상태까지 함께

표시해 주는 확장사건, (σ_f, q_f) 으로 표기하자. 그러면, 다음 두 조건이 만족되는 확장사건 (σ_f, q_f) 을 ' Q_{m_i} 에 대하여 *fault*'라 하고, σ_f 는 '*fault event*'라 부른다.

(i) $\sigma_f \in \Sigma_{an}$,

(ii) $s \in L/\sigma_f := \{t \in \Sigma^* \mid \sigma_f t \in L\}$ 인 사건열이 적어도 하나 이상 있어서, σ_f 가 표기상태의 집합 Q_{m_i} 로 유도가능하고, $s = s_1 s_2 \dots s_n$ 의 각각의 확장사건 (s_i, q_i) 에 대해서 모든 s_i 에 대응하는 상태 q_i 에 대해 $\sigma \in A(q_i) - s_i$ 인 어떤 사건 σ 도 Σ_c 에 속하거나 또다른 *fault event*에 속해야 한다. 이때 $A(q)$ 는 상태 q 에서 발생가능한 모든 사건들의 집합을 나타낸다. 그리고, (σ_f, q_f) 가 *fault*가 아닌 경우 확장사건 (σ_f, q_f) 는 ' Q_{m_i} 에 대하여 *failure*'라 하고, σ_f 는 '*failure event*'라 부른다. 이러한 정의는 만약 어떤 확장사건이 결국 표기상태로 유도될 수 있으면 *fault*, 그렇지 못하면 *failure*임을 의미한다. *Fault*와 *failure*를 정량적으로 구분해내기 위해서 다음의 지표(index)함수를 생각해 보자. 각각의 상태 q 에 대하여 지표함수 I_{m_i} 는 표기상태 Q_{m_i} 에 대하여 다음과 같이 정의된다. 먼저 $q \in Q_{m_i}$ 이면, $I_{m_i}(q_{m_i}) = 1$ 이고, $\sigma' \in A(q) - \{\sigma_f\}$ 인 어떤 사건 σ' 가 Σ_c 에 속하거나 $I_{m_i}(R(\sigma')) = 1$ 이면 $I_{m_i} := 1$ 이다. 그렇지 않은 경우는 $I_{m_i} := 0$ 이다. 여기서 $R(e)$ 는 사건 e 의 결과로 천이되어 가는 상태(e 의 치역)를 나타낸다. 지표함수는 다음 알고리즘에 따라 각각의 상태변수에 할당되어질 수 있다.

Algorithm

- (i) $q_m \in Q_{m_i}$ 이면 $I_{m_i}(q_m) = 1$ 을 할당한다.
- (ii) $I_{m_i}(q_m) = 1$ 인 각각의 $q_i = D(B(q_j))$ 에 대하여, 만약 $A_{m_i}(R(A(q_i) - B(q_j))) = 1$ 이거나 $A(q_i) - B(q_j) \subset \Sigma_c$ 이면 1을 할당한다.
- (iii) 그외의 q 에는 0을 할당한다.

위에서 $B(q)$ 는 상태 q 로 천이되도록 하는 모든 사건들의 집합을 나타내고, $D(e)$ 는 사건 e 가 발생할 당시의 상태(e 의 정의역)를 의미한다. 이와같이 지표함수값이 구해지면, $\sigma \in \Sigma_{uc}$ 인 확장사건 (σ, q) 는 Q_{m_i} 에 대해 $I_{m_i}(q_m) = 1$ 이면 *fault*, $I_{m_i}(q_m) = 0$ 이면 *failure*로 판별할 수 있다.

3.2 내고장성 관리제어

이산사건 모델 상에서 앞서와 같은 고장분석 결과에 따라 내고장성 시스템과 내고장성 관리제어기의 개념을 정립할 수 있다. 내고장성 관리제어기 설계에 있어

서 기본이 되는 개념은 내고장성 사건열로서 시스템내에 존재하는 사건열 중에서 도중에 fault가 발생하더라도 원하는 최종상태에 도달되는 다른 경로가 존재하는 사건열을 의미한다. 또한 그러한 내고장성 사건열이 존재하는 시스템을 내고장성 시스템이라고 한다. 초기상태의 지표함수 값이 1인 경우 그 시스템은 내고장성 시스템이 된다. 내고장성 시스템인 경우는 내고장성 사건열들의 집합을 시스템 사양으로 하는 내고장성 관리제어기를 설계할 수 있게 된다. 이와같이 내고장성 관리제어기에 의해 내고장성 사건열에 따라 동작되는 전체 폐루프 시스템을 내고장성 관리제어 시스템이라고 한다. 이러한 개념을 보다 체계적으로 기술해 보자. 플랜트가 주어진 일을 수행해 가는 도중에 비정상적인 사건이 발생하였을 때 여전히 표기상태로 유도되는 다른 사건열을 찾을 수 있는 경우나 또는 그 비정상적인 사건이 일어날 수 있는 경로를 제거할 수 있을 때 그 시스템은 '내고장성'을 가진다고 한다. 그리고 어떤 사건열이 정상적인 사건과 fault event로만 이루어져 있고, 초기상태로부터 표기상태로 유도되는 도중에 거치는 각각의 상태에 있어서 발생할 수 있는 모든 사건이 제어가능하거나 혹은 또다른 fault event들로 구성되어 있는 사건열을 '내고장성 사건열(Tolerable Fault Event Sequence(TFES) 또는 Recoverable Event Sequence(RES))'이라 부른다. 그리고 모든 i 에 대해 Q_{m_i} 로 유도될 수 있는 적어도 하나 이상의 내고장성 사건열이 존재하는 시스템을 내고장성 시스템이라 한다. 앞서 주어진 이산사건 시스템에 대해 이산사건 모델 상에서 고장분석을 통해 fault와 failure를 정량적으로 구분할 수 있으며 아울러 fault인 경우 RES를 찾아냄으로써 초기상태에서 표기상태로 가는 도중 fault가 발생하더라도 이 RES를 따라 여전히 제어목표를 완성할 수 있다고 언급하였다. 따라서, 만일 주어진 이산사건 시스템내에 RES가 존재하면, 이 사건열상에서 관리제어기를 구성함으로써 내고장성 관리제어 시스템을 구현할 수 있다. 즉,

$L_c(S/G) = \{ s \in L_m(G) \mid s \text{는 RES} \}$ 을 만족하는 관리제어기 S 를 설계하면 된다. 내고장성 관리제어기 존재여부를 판별하기 위해서는 주어진 Q_{m_i} 에 대해 지표함수 I_{m_i} 을 조사하면 된다. 앞서 설명한대로 지표함수를 할당하여 $I_{m_i}(q_0)$ 를 조사하였을 때 $I_{m_i}(q_0) = 1$ 이면 이 시스템에 대한 내고장성 관리제어기를 설계할 수 있다. 따라서, 만일 주어진 이산사건 시스템내에 내고장성 사건열이 존재하면, 이 사건열상에서 관리제어기를 구성함으로써 내고장성 시스템을 구현할 수 있게 된다. 즉, 위의 $L_c(S/G)$ 를 만족하는 관리제어기 S 를 설계하면 이 제어기는 이산사건 시스템을 초기상태에서 표기상태까지 비정상적인 사건이

발생하여도 여전히 제어목표를 완성할 수 있도록 내고장성 시스템을 형성하는 내고장성 관리제어기가 되는 것이다.

3.3 고장진단

시스템의 정상적인 운전동작중 비정상적인 사건발생에 의해 시스템이 정상궤도를 이탈하게 되는 경우, 처음 이탈의 원인이 되었던 원인 failure를 찾기 위해 절점함수(node function)를 이용한 고장진단 알고리즘을 제안하고자 한다. 이를 위해 먼저 시스템의 정상동작을 다음의 공칭사건열로 나타내자. 즉, 초기상태에서 어떤 하나의 표기상태까지 시스템을 동작시키는 정상사건열을 '공칭사건열(Nominal Normal Operating Event Sequence(NNOES) 또는 Nominal Event Sequence (NES))'이라고 하자. 시스템이 NES를 따라 동작하고 있을 때 원하지 않는 변화에 의해 시스템의 동작이 NES에서 이탈할 수 있다. 이런 경우 처음 이탈의 원인이 되었던 failure를 '원인 failure'라고 한다. 이제 failure가 발생했을 때 체계적인 고장진단을 위해 다음의 절점함수를 도입한다. 즉, i 번째 공칭사건열에 대한 q 의 절점함수 집합인 $S_j = \{J_i(q)\}$ 는 다음과 같이 정의된다. 만일 q 가 i 번째 공칭사건열내의 상태에서 도달가능하면서 초기상태로부터는 n 번의 천이에 의해 도달할 수 있고, 공칭사건열로부터의 천이들이 그 첫번째 사건이 이상사건(abnormal event)이면서, 천이들 도중 m 번의 이상사건이 발생했으면 $J_i(q) := (2n + 1)2^m$ 이 되고, 그렇지 않은 경우는 $J_i(q) := 0$ 이 된다. 이렇게 정의된 절점함수를 이용해 어떤 failure가 관측되었을 때 다음의 고장진단 절차에 따라 해당 failure의 원인 failure와 공칭사건열로부터의 천이들 중에 발생한 이상사건의 발생횟수를 알 수 있다. 즉, i 번째 공칭사건열에 대한 확장사건 (σ_f, q) 의 원인 failure들의 집합은

$$S_{f_i}(q) := \{ (\sigma_f, q_s) \mid J_i(q_s) = J_i(q) \pmod{2} \text{ 그리고 } J_i(q) \neq 0 \}$$

가 되고 i 번째 공칭사건열로부터 발생한 이상사건의 수는 ' $\log_2 J_i(q) - \log_2 J_i(q_s)$ '가 된다. 한편, 내고장성 시스템을 구성했음에도 불구하고 관리제어기의 고장에 의해 시스템에 failure가 발생하거나 내고장성 사건열에 속하지 않은 어떤 확장사건에 도달할 수 있다. 이렇게 내고장성 사건열에 속하지 않은 확장사건은 관리제어기의 failure로 정의될 수 있으며 이러한 경우를 고려하여 마찬가지로 고장진단과 신속한 대처를 위해서 다음의 부분수정 절점함수를 도입한다. 즉, i 번째 내고장성 사건열에 대한 q 의 부분수정 절점함수 집합인 $S_{j_i}' = \{J_i'(q)\}$ 는 다음과 같이 정의된다. 만

일 q 가 i 번째 내고장성 사건열내의 상태에서 도달가능 하면서 초기상태로부터는 n 번의 천이에 의해 도달될 수 있고, 내고장성 사건열로부터의 첫번째 천이가 제어가능한 사건이고, 그 천이들 도중 m 번의 이상사건이 발생했으면 $J_i(q) := (2n + 1)2^m$ 이 되고, 그렇지 않은 경우는 $J_i(q) := 0$ 이 된다. 이렇게 정의된 부분수정 절점함수를 이용하면 우리는 다음과 같은 관리제어기 고장진단 절차에 따라 관리제어기의 원인 *failure*와 내고장성 사건열로부터의 천이도중 일어난 이상사건의 수를 알 수 있다. 즉, i 번째 공칭사건열에 대한 확장사건 (σ_f, q) 의 원인 *failure*들의 집합은

$$S_{f_i}'(q) := \{(\sigma_f, q_s) \mid J_i'(q_s) = J_i'(q) \bmod 2 \text{ 또한 } J_i'(q) \neq 0 \text{ 그리고 } I_m(q_s) = 1\}$$

가 되고 i 번째 공칭사건열로 부터 발생한 이상사건의 수는 ' $\log_2 J_i'(q) - \log_2 J_i'(q_s)$ '가 된다.

4. 플라즈마 식각시스템의 사례연구

플라즈마 식각장비[7]는 VLSI 회로 제작과정 중 여러공정에서 매우 중요한 역할을 수행하는 장비로서 요구되는 고신뢰도와 고성능을 만족시키기 위해서는 예상치 않은 장비의 고장으로 인한 운전중지 시간을 최소화해야만 한다. 따라서 체계적이고 해석적인 고장진단 기법의 개발은 필수적이라고 할 수 있겠다. 플라즈마 식각장비는 널리 쓰이고 있는 반면 그 동적특성이 너무 복잡하고 난해하여 고전적 수학기법으로 모델링하기가 어렵다. 이에 본 절에서는 앞서 기술한 이산사건 시스템적 접근방법을 통해 플라즈마 식각시스템의 해석 및 제어에 대한 사례연구를 보인다 [9].

다음의 그림 1은 플라즈마 식각장비의 전체 구성도를 보이고 있다. 시스템의 제어대상변수는 플라즈마 시료가스 밀도와 유량(flow rate), RF 전력(E), 플라즈마 챔버(chamber)내의 압력(P) 등이다. 측정변수들은 식각 시료가스 밀도와 전기장 대 압력의 비율(E/P)이다. 플라즈마 활성시료의 농도를 측정하기 위한 광학발광분광기(optical emission spectroscopy)와 플라즈마 전도센서(plasma conduction sensor), 압력센서 등이 있다. 이 시스템의 제어목적은 웨이퍼 표면의 식각상태를 균일하게 만들기 위해 유량과 플라즈마 챔버내의 전기장 대 압력의 비를 일정하게 유지하는 것이다.

4.1 고장 진단

그림 1의 A와 C부분을 생각해 보자. 이때 유량제어기(mass flow controller)와 밸브가 이상사건에 의해 영향을 받는다고 가정하자. 그림 2는 A와 C부분의 성분 이산사건 모델이다. 그림 2에서 F_U(Flow rate_UP), F_S(Flow rate_Set), 그리고 F_D(Flow rate_Down)은 유

량제어기의 정상사건이고, F_US(Flow rate_Up Stuck)와

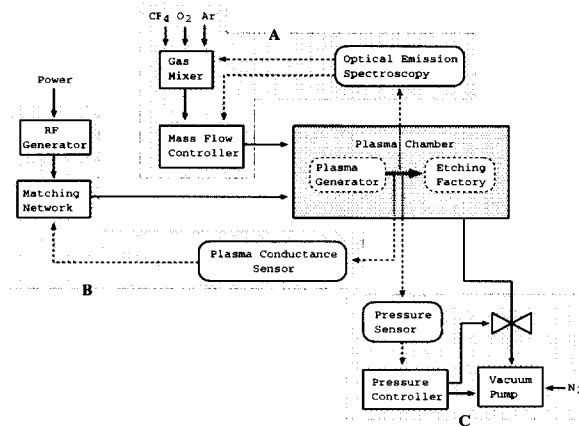


그림 1. 플라즈마 식각시스템의 전체 구성도.

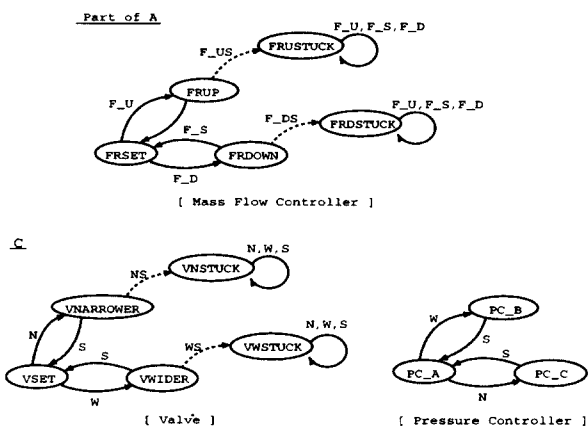
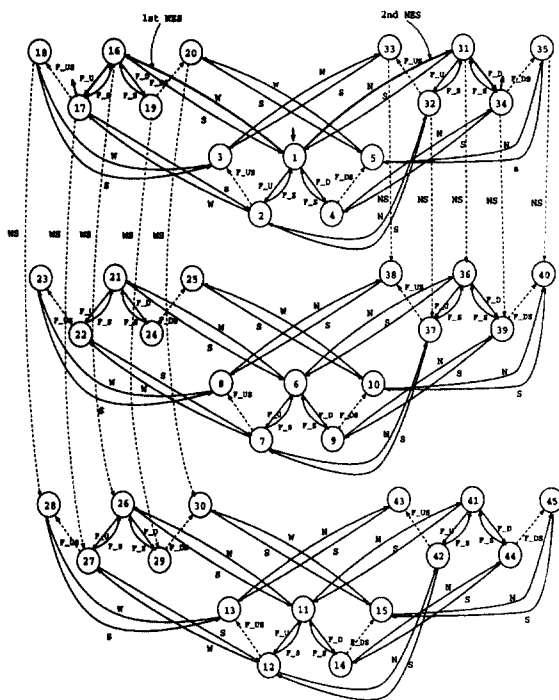


그림 2. A와 C부분의 성분 이산사건 모델.



④ q : state number

그림 3. A와 C의 병렬합성 이산사건 모델.

F_DS(Flow rate Down Stuck)는 이상사건을 나타낸다. 압력제어기는 W(valve Wider), S(valve Set)와 N(valve Narrower) 등의 명령을 발생시킨다. 밸브는 WS(Wider Stuck)와 NS(Narrower Stuck) 등의 이상사건에 의해 영향을 받는다. 전체 시스템의 병렬합성 모델은 그림 3과 같다. 표 1은 그림 3의 각 상태와 해당내용을 나타낸다. 이 경우 초기상태는 그림 3의 상태 '1'이 되며, 표기상태는 '17'과 '34'이다. 이제 동작모드에 따라 표기상태 집합 1, m_1 은 {17}로, 집합 2, m_2 는 {34}로 정하자. 각 상태에 대한 지표함수값은 표 2에 나타나 있다. 우리는 표 2로부터 이 경우 표기상태 자체를 제외하고는 더 이상 fault가 존재하지 않음을 알 수 있다. 그리고 초기상태에 대해 $I_{m_1}(1) = I_{m_2}(1) = 0$ 이므로 이 시스템에 내고장성 사건열은 존재하지 않음을 알 수 있다.

이제 첫번째 공칭사건열을 $W \rightarrow F_U$ ($1 \rightarrow 16 \rightarrow 17$), 두번째 공칭사건열을 $N \rightarrow F_D$ ($1 \rightarrow 31 \rightarrow 34$)로 가정하자. 이에 대한 절점함수값은 표 2에 나타나 있다. Failure가 발생하는 경우에는 앞서의 고장진단 절차에 따라 원인 failure를 찾아낼 수 있다. 예를 들면, 만일 (F_US, 42)가 발생했다면

$$S_{f_i}(42) = \{0, 3 \times 2^1, 5 \times 2^1\}^1 \text{이고}$$

$S_{f_i}(16) = \{3\}^1, S_{f_i}(17) = \{5\}^1$ 이므로 원인 failure가 (F_U, 16), 혹은 (F_US, 17)이 되고, 이상사건이 한번 발생했거나 또는 failure가 시스템의 오동작 때문이 아니라 시스템 운영자의 실수 때문에 발생한 것임을 추론할 수 있다.

4.2 내고장성 시스템 및 내고장성 관리제어기

다음은 그림 1의 B와 C부분을 생각해 보자. 이 경우 RF 발생기와 밸브가 이상사건에 의해 고장이 발생할 수 있다고 가정하였을 때 성분 이산사건 모델은 그림 4와 같다.

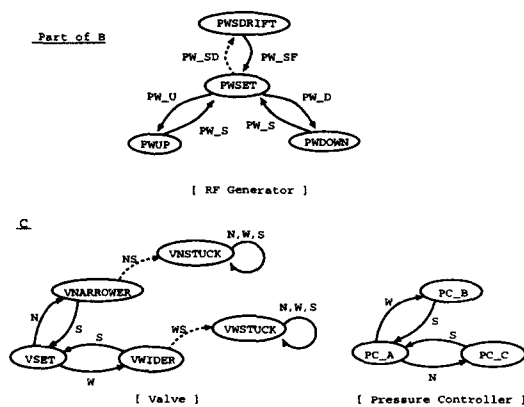


그림 4. B와 C부분의 성분 이산사건 모델.

표 1. 그림 3의 이산사건 모델에 대한 상태정의.

state	contents	state	contents	state	contents
1	(PC_A, VSET, FRSET)	16	(PC_B, VWIDER, FRSET)	31	(PC_C, VNNARROWER, FRSET)
2	(PC_A, VSET, FRUP)	17	(PC_B, VWIDER, FRUP)	32	(PC_C, VNNARROWER, FRUP)
3	(PC_A, VSET, FRUPSTUCK)	18	(PC_B, VWIDER, FRUPSTUCK)	33	(PC_C, VNNARROWER, FRUPSTUCK)
4	(PC_A, VSET, FRDOWN)	19	(PC_B, VWIDER, FRDOWN)	34	(PC_C, VNNARROWER, FRDOWN)
5	(PC_A, VSET, FRDSTUCK)	20	(PC_B, VWIDER, FRDSTUCK)	35	(PC_C, VNNARROWER, FRDSTUCK)
6	(PC_A, VNSTUCK, FRSET)	21	(PC_B, VNSTUCK, FRSET)	36	(PC_C, VNSTUCK, FRSET)
7	(PC_A, VNSTUCK, FRUP)	22	(PC_B, VNSTUCK, FRUP)	37	(PC_C, VNSTUCK, FRUP)
8	(PC_A, VNSTUCK, FRUPSTUCK)	23	(PC_B, VNSTUCK, FRUPSTUCK)	38	(PC_C, VNSTUCK, FRUPSTUCK)
9	(PC_A, VNSTUCK, FRDOWN)	24	(PC_B, VNSTUCK, FRDOWN)	39	(PC_C, VNSTUCK, FRDOWN)
10	(PC_A, VNSTUCK, FRDSTUCK)	25	(PC_B, VNSTUCK, FRDSTUCK)	40	(PC_C, VNSTUCK, FRDSTUCK)
11	(PC_A, VWTUCK, FRSET)	26	(PC_B, VWTUCK, FRSET)	41	(PC_C, VWTUCK, FRSET)
12	(PC_A, VWTUCK, FRUP)	27	(PC_B, VWTUCK, FRUP)	42	(PC_C, VWTUCK, FRUP)
13	(PC_A, VWTUCK, FRUPSTUCK)	28	(PC_B, VWTUCK, FRUPSTUCK)	43	(PC_C, VWTUCK, FRUPSTUCK)
14	(PC_A, VWTUCK, FRDOWN)	29	(PC_B, VWTUCK, FRDOWN)	44	(PC_C, VWTUCK, FRDOWN)
15	(PC_A, VWTUCK, FRDSTUCK)	30	(PC_B, VWTUCK, FRDSTUCK)	45	(PC_C, VWTUCK, FRDSTUCK)

그림 4에서 PW_U(PoWer_Up), PW_S(PoWer_Set), PW_D(PoWer_Down), 그리고 PW_SF(PoWer_SetFixing)은 RF 발생기의 정상사건이고 PW_SD(PoWer_SetDrift)는 RF 발생기에서 발생가능한 이상사건이다. 이때, 초기전력 설정치가 PW_SD에 의해 작은 범위내에서 변화될 수 있으며 이는 PW_SF에 의해 보정될 수 있다고 가정하였다. 압력제어기는 W(valve Wider), S(valve Set), 그리고 N(valve Narrower)라는 명령을 발생시킨다. 밸브는 WS(Wider Stuck), NS(Narrower Stuck)와 같은 이상사건에 의해 영향을 받는다. 전체 시스템의 병렬합성 모델은 그림 5와 같다. 그림 5의 각각의 상태와 내용은 표 3에 나타나 있다. 이 경우 초기상태는 상태 1이고, 표기상태는 단지 과도기(transient period)만을 생각하였을 때 15, 19, 28, 36이 된다. 즉, 제어목적이 전기장과 압력의 비를 일정하게 유지하는 것이기 때문에 과도기동안 밸브의 오동작이 있더라도 RF 전력을 조절함으로써 여전히 제어 목적을 만족시킬 수 있는 것이

표 2. 그림 3의 이산사건 모델에 대한 지표함수와 절점함수.

state(q)	$I_{m_1}(q)$	$I_{m_2}(q)$	$S_{J_i}(q)$
1	0	0	{ 1 } ^{1,2}
2	0	0	{ 0 } ¹
3	0	0	{ 0 } ¹
4	0	0	{ 0 } ²
5	0	0	{ 0 } ²
6	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
7	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
8	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
9	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
10	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
11	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
12	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
13	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
14	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
15	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
16	0	0	{ 3 } ¹
17	1	0	{ 5 } ¹
18	0	0	{ 0, 5×2 ¹ } ¹
19	0	0	{ 0 } ¹
20	0	0	{ 0 } ¹
21	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
22	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
23	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
24	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
25	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
26	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
27	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
28	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
29	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
30	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
31	0	0	{ 3 } ²
32	0	0	{ 0 } ²
33	0	0	{ 0 } ²
34	0	1	{ 5 } ²
35	0	0	{ 0, 5×2 ¹ } ²
36	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
37	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
38	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
39	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ²
40	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ²
41	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
42	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
43	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
44	0	0	{ 0, 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
45	0	0	{ 0, 3×2 ² , 5×2 ² } ¹

다. 이제 동작모드에 따라 표기상태 집합 1, m_1 을 {15, 19}로, 집합 2, m_2 를 {28, 36}으로 분류하자. 표 4에 해당 지표함수값이 주어져 있다. 이로부터 우리는

fault와 failure를 구분할 수 있고, 더 나아가 이 시스템에 대한 내고장성 관리제어기가 존재한다는 것을 알 수 있다. 표기상태들로 도달할 수 있는 내고장성 사건열들은 RES1=W PW_U, RES2=W PW_U WS, RES3=W WS PW_U, RES4=PW_SD W PW_SF PW_U, RES5=PW_SD W PW_SF PW_U WS, RES6=PW_SD W PW_SF WS PW_U, RES7=PW_SD W WS PW_SF PW_U, RES8=PW_SD PW_SF W PW_U, RES9=PW_SD PW_SF W PW_U WS, RES10=PW_SD PW_SF W WS PW_U 등이다. 이들 중에서 관리제어기의 고장진단기법을 설명하기 위해 동작모드에 따라 다음 두가지 내고장성 사건열을 생각해 보자. 첫번째 내고장성 사건열을 RES1=PW_U → W (1 → 3 → 15), 두번째 내고장성 사건열을 RES2=PW_D → N (1 → 4 → 28)이라고 놓으면, 우리는 이를 기초로 내고장성 관리제어 시

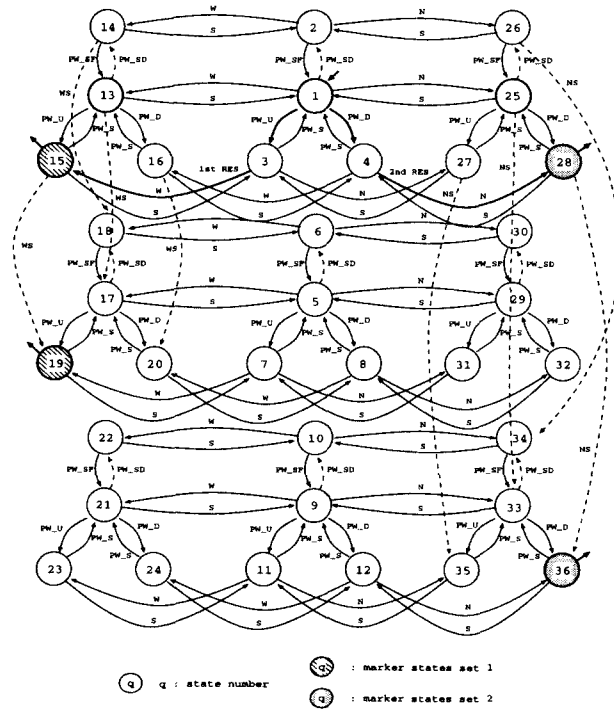


그림 5. B와 C부분의 병렬합성 이산사건 모델.

시스템을 구성할 수 있다.

이러한 내고장성 관리제어기의 구성절차는 다음과 같다. $\Sigma_c = \{PW_S : c_1, PW_U : c_2, PW_D : c_3, PW_SF : c_4, S : c_5, W : c_6, N : c_7\}$ 이고, $\Sigma_{uc} = \{WS, NS, PW_SD\}$ 이며, 여기서 c_i 는 제어값을 나타낸다. $L_g = \{\text{첫 번째 내고장성 사건열, 두 번째 내고장성 사건열}\}$ 이라고 하면 L_g 는 제어가능하다. 그러므로 $L_c(S/G) = L_g$ 을 만족하는, 즉 제어목적에 부합되는 관리제어기 $S = (S, \phi)$ 가 존재한다. L_g 의 인식기(recoginzer)의 상태 천이도는 그림 6과 같다.

표 3. 그림 5의 이산사건 모델에 대한 상태정의.

state	contents	state	contents	state	contents
1	(PC_A, VSET, PWSET)	13	(PC_B, VWIDER, PWSET)	25	(PC_C, VNNARROWER, PWSET)
2	(PC_A, VSET, PWSDRIFT)	14	(PC_B, VWIDER, PWSDRIFT)	26	(PC_C, VNNARROWER, PWSDRIFT)
3	(PC_A, VSET, PWUP)	15	(PC_B, VWIDER, PWUP)	27	(PC_C, VNNARROWER, PWUP)
4	(PC_A, VSET, PWDOWN)	16	(PC_B, VWIDER, PWDOWN)	28	(PC_C, VNNARROWER, PWDOWN)
5	(PC_A, VWSTUCK, PWSET)	17	(PC_B, VWSTUCK, PWSET)	29	(PC_C, VWSTUCK, PWSET)
6	(PC_A, VWSTUCK, PWSDRIFT)	18	(PC_B, VWSTUCK, PWSDRIFT)	30	(PC_C, VWSTUCK, PWSDRIFT)
7	(PC_A, VWSTUCK, PWUP)	19	(PC_B, VWSTUCK, PWUP)	31	(PC_C, VWSTUCK, PWUP)
8	(PC_A, VWSTUCK, PWDOWN)	20	(PC_B, VWSTUCK, PWDOWN)	32	(PC_C, VWSTUCK, PWDOWN)
9	(PC_A, VNSTUCK, PWSET)	21	(PC_B, VNSTUCK, PWSET)	33	(PC_C, VNSTUCK, PWSET)
10	(PC_A, VNSTUCK, PWSDRIFT)	22	(PC_B, VNSTUCK, PWSDRIFT)	34	(PC_C, VNSTUCK, PWSDRIFT)
11	(PC_A, VNSTUCK, PWUP)	23	(PC_B, VNSTUCK, PWUP)	35	(PC_C, VNSTUCK, PWUP)
12	(PC_A, VNSTUCK, PWDOWN)	24	(PC_B, VNSTUCK, PWDOWN)	36	(PC_C, VNSTUCK, PWDOWN)

이 인식기를 S 로 하였을 때, 이제 그에 따른 ϕ 를 정하면 되는데 S 의 각 상태 x 에 대해 $\phi(x)$ 는 다음과 같은 대응(mapping)으로 나타내어진다.

$$\phi(x) : \{c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, c_6, c_7\} \mapsto \{0, 1\}.$$

여기서 $\phi(x)(c_i)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\phi(\sigma, x) = \begin{cases} 1, & \text{만일 } c_i \text{에 대응하는 } edge \text{가 내고장} \\ & \text{사건열 상에 있을 때,} \\ 0, & \text{그렇지 않을 때.} \end{cases}$$

그러면 결과적으로 표 5와 같은 제어형태(pattern)가 구해지고, 이렇게 구성된 $S = (S, \phi)$ 에 의해 $L(S/G) = \overline{L_g}$, $L_m(S/G) = L_g$ 가 되어 내고장성 관리제어 시스템이 구성되어진다.

관리제어기 고장진단을 위한 부분수정 절점함수값의 집합들은 표 4에 나타나 있다. (두번째 내고장성 사건열에 대한 부분수정 절점함수 값의 집합은 첫번째 내고장성 사건열에 대한 부분수정 절점함수 값의 집합들과 완전대칭이므로 생략하였다.) 만일 이 시스템에서 관리제어기의 failure가 발생한다면 우리는 앞서의 진단절차에 따라 이 값을 이용하여 원인 failure를 찾아 낼 수 있다.

표 4. 그림 5의 이산사건 모델에 대한 지표함수와 부분수정 절점함수.

state(q)	$I_{m_1}(q)$	$I_{m_2}(q)$	$S_{f_i}'(q)$
1	1	1	{ 1 } ¹
2	1	1	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
3	1	1	{ 3 } ¹
4	1	1	{ 1, 3, 5 } ¹
5	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
6	1	0	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ¹ , 5×2 ² } ¹
7	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
8	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
9	0	1	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
10	0	1	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
11	0	1	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
12	0	1	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
13	1	0	{ 1, 3, 5 } ¹
14	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
15	1	0	{ 5 } ¹
16	1	0	{ 1, 3, 5 } ¹
17	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
18	1	0	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ¹ , 5×2 ² } ¹
19	1	0	{ 5 } ¹
20	1	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
21	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
22	0	0	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
23	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
24	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
25	0	0	{ 1, 3, 5 } ¹
26	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
27	0	0	{ 1, 3, 5 } ¹
28	0	0	{ 1, 3, 5 } ¹
29	0	1	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
30	0	0	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ¹ , 5×2 ² } ¹
31	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
32	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5, 5×2 ¹ } ¹
33	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
34	0	0	{ 1×2 ² , 3×2 ² , 5×2 ² } ¹
35	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹
36	0	0	{ 1×2 ¹ , 3×2 ¹ , 5×2 ¹ } ¹

표 5. 관리제어기 S의 제어형태.

state	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4
ϕ	0110000	0000010	0000000	0000001	0000000

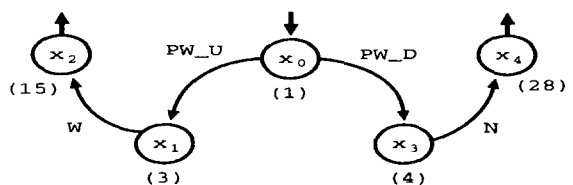


그림 6. Lg의 인식기 오토마톤.

5. 결 언

본 논고에서는 반도체 생산자동화 시스템의 기반기술구축을 목적으로 이산사건 모델을 이용한 공정모델링, 고장분석, 내고장성 관리제어 및 고장진단 기법 등의 공정운영에 관한 연구를 소개하였다. 본 논고에서 다룬 이산사건 시스템적 접근방법은 기존의 연속변수 영역에서 이루어지고 있는 서보제어 관련 여러 연구결과와 계층적 구조로 어우러져 실제 반도체 생산시스템의 자동화를 구현할 수 있다. 즉, 각각의 서보제어기는 대상플랜트에 직접 연결된 하위레벨 제어구조를 이루고, 본 논고에서 다룬 이산사건 시스템 영역에서의 제어기는 상위레벨의 제어구조를 담당해 시스템 감시, 고장대처, 관리제어 등을 수행하며 인터페이스를 통해 하위레벨 제어기와 플랜트에 연결됨으로써 전체 제어루틴을 형성할 수 있게 된다. 한편, 이산사건 시스템적 접근방법을 통한 반도체 생산시스템 자동화와 관련된 연구결과로서 고속열처리 공정기(rapid thermal processor)에 대한 사례연구는 [10], 전체적인 반도체생산 스케줄링에 관한 연구는 [11], 웨이퍼 노광(photolithography) 장비의 사례연구는 [12] 등에서 찾을 수 있다.

참고문헌

- [1] D. A. Handelman and R. F. Stengel, "Combining expert system and analytical redundancy concept for fault-tolerant flight control", *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 12, pp. 39-45, 1989.
- [2] J. J. Gertler and K. C. Anderson, "An evidential reasoning extension to quantitative model-based failure diagnosis", *IEEE Trans. on System, Man, and Cybernetics*, vol. 22, pp. 275-289, 1992.
- [3] R. J. Patton and J. Chen, "Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems", *J. of Guidance, Control, and Dynamics*, vol. 17, pp. 278-285, 1994.
- [4] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D. Teneketzis, "Failure diagnosis using discrete event models", *Proc. Conf. on Decision and Control*, pp. 3110-3116, 1994.
- [5] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete event processes", *SIAM J. of Control and Optimization*, vol. 25, pp. 206-230, 1987.
- [6] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "The control of discrete event systems", *Proc. IEEE, Special Issue on Discrete Event Dynamic Systems*, vol. 77, no. 1, pp. 81-98, 1989.
- [7] K. J. McLaughlin, T. F. Edgar, and I. Trachtenberg,

"Real-time monitoring and control in plasma etching", *IEEE Control Systems*, pp. 3-10, April 1991.

- [8] M. Heymann, "Concurrency and discrete event control", *IEEE Control Systems*, pp. 103-112, June 1990.
- [9] K.-H. Cho and J.-T. Lim, "Failure diagnosis and fault tolerant supervisory control system", *IEICE Trans. on Information and Systems*, vol. E79-D, no. 9, pp. 1223-1231, 1996.
- [10] S. Balemi, G. J. Hoffmann, P. Gyugyi, H. Wong-Toi, and G. F. Franklin, "Supervisory control of a rapid thermal multiprocessor", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 38, pp. 1040-1059, 1993.
- [11] S. Li, T. Tang, and D. W. Collins, "Minimum inventory variability schedule with applications in semiconductor fabrication", *IEEE Trans. on Semiconductor Manufacturing*, vol. 9, pp. 145-149, 1996.
- [12] K.-H. Cho and J.-T. Lim, "Synthesis of fault-tolerant supervisor for automated manufacturing systems: a case study on photolithographic process", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 14, no. 2, pp. 348-351, 1998.

저자소개

조 광 현

1993년 한국과학기술원 전기및전자공학 졸업, B.S.

1995년 한국과학기술원 전기및전자공학, M.S.

1995년-현재, 한국과학기술원 전기 및 전자공학, Ph.D. 과정.

<관심분야>

◦ Supervisory control of discrete event systems, nonlinear control, hybrid systems, applications including: factory automation, supervisory control of semiconductor manufacturing systems, congestion control of communication networks, traffic management in IVHS, etc.

(305-701) 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원 전기및전자공학과

Tel. 042) 869-5441 / Fax. 042) 869-3410 / E-mail : ckh@stcon1.kaist.ac.kr.

임 종 태

1967년-1975년 연세대학교 전기공학, B.S.

1975년-1981년 한국전력공사

1981년-1983년 Illinois Institute of Technology, EECS, M.S.

1983년-1986년 University of Michigan, EECS, Ph.D.

1986년-1987년 University of Michigan, EECS, Research

Fellow
1994년-1995년 University of Michigan, EECS, Visiting
Professor
1988년-현재, KAIST, 전기및전자공학과, 교수.
<관심분야>
◦ Analysis and control of nonlinear systems, supervisory
control of discrete event systems, congestion control of

communication networks, analysis and synthesis of
manufacturing systems.
(305-701) 대전광역시 유성구 구성동 373-1 한국과학기술원
전기및전자공학과.
Tel. 042) 869-3441 / Fax. 042) 869-3410 / E-mail :
jtlim@stcon.kaist.ac.kr.

ICASE home page 안내

1. 주 소 : <http://icat.snu.ac.kr/icase/>
2. 구 성 : 본 학회의 논문 작성요령과 논문원문 서비스를 구축중에 있으며, 사진이 포함된 회원 D/B를 구축 하였습니다.
3. home page에 방문하여 신상명세와 기타 추가적인 수정사항이 있을 경우, 아래의 사무국 전화번호를 참고하 시어 수정 및 정정하여 주시기 바랍니다.
4. 또한 회원 D/B에 본인의 사진이 포함되어 있지 않은 경우는, 사무국으로 반명함판 사진을 보내주시면 입력 하도록 하겠습니다.

기타의 자세한 사항은 본 학회 사무국으로 문의하여 주시기 바랍니다.

제어·자동화·시스템공학회 사무국.

주 소 : (우)135-703 서울시 강남구 역삼동 635-4 과학기술회관 본관 406호

Tel. 508-5801, 508-5830, Fax. 555-4746, E-mail : icase@chollian.dacom.co.kr