특별연재

이산사건시스템의 관리제어(VI)

강인 관리제어

박 성 진*, 조 광 현**, 임 종 태*
*한국과학기술원 전기 및 전자공학부, **울산대학교 전기전자 및 자동화공학부

Abstract : 본 논문에서는 모델 불확정성을 가진 이산사건시스템의 강인 관리제어이론에 대해 알아본다. 지금까지 연구된 불확정성 이산사건시스템은 크게 두 부류로 구분된다. 첫째는 다중모델의 집합으로 표현되는 불확정성 시스템으로서 제어대상이 되는 시스템의 동적 특성이 몇 가지의 가능한 이산사건모델들의 집합으로 기술되는 시스템이다 두번째는 비결정성 시스템으로서 시스템의 한 상태에서 하나의 동일 사건발생에 의해 천이되는 상태가 두 가지 이상이 존재하여 상태천이에 있어 불확정성이 존재하는 시스템이다. 본 논문에서는 두 가지 형태의 불확정성 이산사건시스템들에 대한 강인 관리제어기 설계문제에 대해 살펴보고, 강인 관리제어이론에 대한 최근의 연구동향과 발전방향에 대해 소개한다

1. 서론

제어대상이 되는 시스템의 동적 특성이 부분적으로만 알려진 경우 시스템에 대한 해석 및 제어는 한계를 지닌다. 강인 제어이론은 시스템 모델의 불확정성이 해소되지 않은 상황에서 시스템을 제어하는 기법으로서 지금까지는 주로 연속변수시스템의 분야에서 활발하게 연구되어 왔다. 그러나 이러한 모델 불확정성의 문제는 이산사건시스템 영역에서도 존재하며 최근 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 기존 연구결과들을 토대로 모델 불확정성을 가진 이산사건시스템의 강인 관리제어이론에 대해 소개한다.

이산사건시스템의 모델링에 있어서 불확정성은 몇 가지의 형태를 가질 수 있는데, 먼저 제어대상이 되는 시스템의 모델이 [1]-[4]에서처럼 하나의 모델로서만 기술될 수 없는 경우가 있다. 이런 경우 시스템의 모델은 몇 가지 가능한 모델들의 집합으로서 기술될 수 있는데 [5]-[9], [13], [14], 특히 [5]에서는 이러한 다중모델(multiple model)로 기술되는 불확정성 이산사건시스템에 대한 강인 관리제어문제를 최초로 소개하고 있다 [5]에서는 다중모델 집합에 속한 모든 모델들에 대하여 주어진 하나의 공통된 언어사양(language specification)을 만족시키는 하나의 강인 관리제어기가 존재할 필요충분조건을 제안하였다. 또한 [6]에서는 불확정성 이산사건시스템에 대한 몇 가지 가능한 모델들의 집합 가운데서 정확한 하나의 모델을 찾는 알고리즘을 제안하고 있는데, 유일한 모델이 존재하지 않는 경우에는 [5]에서 제안된 강인 관리제어기의 설계가 필요하게 된다. [7]에서는 관리제어하에서 주어진 하나의 사양이 만족되는 시스템 모델의 수를 최대로 하는 강인 관리제어문제를 다루었다. 그리고 이러한 다중모델로 표현되는 불확정성 이산사건시스템에 대한 강인 관리제어이론은 비고장성 관리제어와 시간이산사건시스템(timed discrete event systems)의 관리제어문제에 확대 적용되었다 [8], [13], [14].

이산사건시스템의 모델 불확정성의 또 하나의 형태는 비결정성(nondeterministic) 시스템이다. 비결정성 시스템에서는 현재의 상태와 다음 발생할 사건에 대한 정보가 시스템의 천이상태를 유일하게 결정하기에 충분하지 못하여 상태천이에서 불확정성이 존재하는 시스템이다. 이러한 비결정성은 모델링되지 않는 시스템의 동적 특성이나 부분관측(partial observation)에 의해 주로 발생한다. 비결정성 시스템의 분석은 기존의 단순한 언어모델(language model) 만으로는 충분하지 못한 복잡성을 지니고 있다. 따라서 [15]에서는 비결정성 시스템의 분석을 위해 궤적모델(trajectory models)과 고장의미론(failure semantics) 모델링 기법을 제안하고 있는데, 이는 언어모델에 비해서 시스템 동작에 대한 보다 상세한 정보를 포함하는 모델링 방식이다. [16]-[19]에서는 이러한 궤적모델을 이용한 이산사건시스템의 관리제어문제에 대한 연구결과들을 보여주고 있다. 특히 [18], [19]에서는 궤적모델을 바탕으로 하여 비결정성 시스템을 부분관측하에서의 결정성 시스템으로 변환하고, 기존의 결정성 시스템을 위한 관리제어기 설계기법을 적용함으로써 비결정성 시스템의 관리제어기 설계문제를 다루고 있다. [20]에서는 비결정성 시스템을 위한 또 다른 모델링 방식인 고장의미론 모델에 기반한 관리제어기 설계문제에 대한 연구가 이루어졌다. 비결정성 시스템을 위한 궤적모델이나 고장의미론 모델은 언어모델에 비해 복잡한 모델링 기법이다. [21]에서는 기존의 언어모델을 이용하여 비결정성 시스템의 비막힘성 관리제어기 설계문제를 제안하였는데, 주어진 비결정성시스템

을 몇 개의 결정성 다중모델들의 집합으로 분할하고 언어모델 분석을 통한 비박힘성 관리제어기(nonblocking supervisor) 설계문제를 다루었다.

본 논문에서는 앞서 소개된 모델 불확정성을 가진 이산사건시스템의 관리제어이론에 대한 기존의 연구결과들을 다음과 같은 순서로 소개한다. 먼저 2절에서는 다중모델의 불확정성 시스템에 대한 기존의 강인 관리제어이론의 연구결과들을 소개하고, 3절에서는 비결정성 시스템에 대한 관리제어이론의 연구결과들을 살펴보며, 마지막으로 4절에서 결론을 맺는다.

본 논문에서 사용될 오토마타에 기반한 이산사건모델링에 관련된 기본적인 표기들은 [1]-[4]에서 사용하는 표기방식에 준하므로 본 논문에서는 반복적인 설명을 생략하기로 한다.

2. 다중모델 불확정성 이산사건시스템의 강인 관리제어

이산사건시스템에 불확정성이 존재하는 경우 하나의 오토마톤(automaton) 모델만으로 시스템 모델을 기술하는 것이 적절하지 못한 경우가 있을 수 있다. 이러한 경우 몇가지 가능한 오토마톤 모델들의 집합으로 시스템의 모델을 기술할 수 있다. 이 때 다중모델상에서 불확정성을 가진 이산사건시스템의 강인 관리제어 목적은 임의의 모델들을 제어하여 주어진 하나의 사양을 만족시키게 하는 것이다[5].

제어대상이 되는 다중모델의 불확정성 이산사건시스템 G는 다음과 정의된다:

$$G := \{G_1, G_2, \cdots, G_n\}.$$

즉, 다중모델은 n개의 오토마톤들로 구성되며 설계할 관리제어기는 제어 대상 모델의 불확정성하에서 제어를 하게되는 것이다. 이러한 강인 관리제어문제는 다음과 같이 기술될 수 있다.

다중모델의 강인 관리제어문제 2.1[5] : 주어진 사양언어 $K \subseteq \bigcap_{i=1}^{n} L_m(G_i)$하에서 모든 모델 G_i에 대해 $L(S/G_i) = \overline{K}$를 만족하는 하나의 비박힘성 강인 관리제어기 S가 존재할 필요충분조건은 무엇인가?

위 문제에 대한 해는 다음 명제 2.1을 통해 주어진다.

명제 2.1[5] : 강인 관리제어문제 2.1의 해는 주어진 사양언어 K가 $\bigcup_{i=1}^{n} L(G_i)$에 대해 제어가능성(controllability)[1] 과 관측가능성(observability)[4]의 두 성질을 모두 만족해야 하는 것이다.

명제 2.1의 증명은 다음과 같은 직관적인 관찰에 의해 쉽게 이해될 수 있다. 즉, 언어사양 K가 $\bigcup_{i=1}^{n} L(G_i)$에 대해 제어가능하고 관측가능하면 각 $L(G_i)$에 대해서도 제어가능하고 관측가능하며, 또한 K가 모든 성분모델들의 동작에 공통으로 속해 있으므로 각 G_i에 대해 [1]-[4]의 결과들에 따라 $L(S/G_i) = \overline{K}$를 만족하는 비박힘성 관리제어기 S가 존재하게 되는 것이다.

앞의 강인 관리제어문제 2.1은 주어진 언어사양과 동일한 제어결과를 가지는 강인 관리제어기 설계문제를 다룬다. 언어사양이 다음과 같이 상위 및 하위 경계를 나타내는 언어들의 범위로 주어진 경우의 관리제어문제는 다중모델 강인 관리제어문제 2.2로 분류될 수 있다 $A \subseteq E \subseteq \bigcap_{i=1}^{n} L(G_i)$.

위 식에서 A는 최소 수용가능한(minimally acceptable) 언어사양이며 E는 최대의 정상적(maximal legal) 언어사양이다. 또한 A와 E는 닫힘성을 지닌(closed) 공집합이 아닌 언어로 가정한다.

다중모델의 강인 관리제어문제 2.2[5] G에 속한 모든 성분모델 G_i에 대해 $A \subseteq L(S/G_i) \subseteq E$를 만족하는 하나의 강인 관리제어기 S가 존재할 필요충분조건은 무엇인가?

문제의 해를 위해 다음의 두 언어를 소개한다:

$$C(E) := \{ K \subseteq E \mid K\text{는 } \bigcup_{i=1}^{n} L(G_i)\text{에 대해 닫힘성을 가지며 제어가능함}\},$$

$$O(A) := \{ K \supseteq A \mid K\text{는 } \bigcup_{i=1}^{n} L(G_i)\text{에 대해 닫힘성을 가지며 관측가능함}\}.$$

[1]-[4]에서 보이지는 것처럼 $C(E)$는 임의의 합집합 연산에 대해 닫혀있으며, $O(A)$는 임의의 교집합 연산에 대해 닫혀 있다. 이때 다중모델의 강인 관리제어문제 2.2에 대한 해는 다음과 같은 명제로 설명될 수 있다

명제 2.2[5] : 다중모델의 강인 관리제어문제 2.2에 대한 해는 다음과 같은 필요충분 조건으로 주어진다:

$$\inf O(A) \subseteq \sup C(E).$$

명제 2.2에서 $\inf O(A)$는 언어 A를 포함하는 최저 닫힘 관측가능 초언어(infimal closed and observable superlanguage)이며 $\sup C(E)$는 E에 포함되는 최대 닫힘 제어가능 부언어(supremal closed and controllable sublanguage)이다[1]-[4]. 명제 2.2의 필요충분조건 $\inf O(A) \subseteq \sup C(E)$은 $\inf O(A) \subseteq K \subseteq \sup C(E)$를 만족하는 닫힌 언어 K의 존재를 가능하게 하며, 명제 2.1을 통해 강인 관리제어기의 존재가 증명될 수 있다.

지금까지 소개한 [5]에서의 강인 관리제어이론 문제는 달성하고자 하는 언어사양이 다중모델을 구성하고 있는 모든 성분모델들의 동작에 공통으로 속해있는 경우를 다루고 있다. 그러나 앞의 가정과는 달리 주어진

언어사양이 각 성분모델들에 흩어져 있는 경우, 즉 일반적으로 언어사양이 성분모델들 동작의 교집합에 속해 있지 않는 경우의 강인 관리제어문제는 기존의 방법들과는 다르게 해석되어야 한다. [13], [14]에서는 이러한 경우의 강인 관리제어기 설계문제를 내고장성 제어의 관점에서 다루고 있는데 일반적인 사양으로 확대 적용될 수 있는 결과를 지금부터 소개한다.

이산사건시스템 프레임(frame)상에서의 고장진단 및 내고장성 관리제어이론들은 [10]-[12]를 포함하는 연구결과들에 의해 활발히 논의되고 있다 특히 관리제어시스템의 내고장성 관점에서 내고장성 사건열의 개념을 소개한 [12]에서의 연구결과를 바탕으로 하여 [13], [14]에서는 다중모델 불확정성을 가진 이산사건시스템에 대한 강인 관리제어이론을 소개하고 있다. 우선 각 성분모델 G_i에서의 내고장성을 나타내는 내고장성 사건열들의 집합을 $TF(G_i)(\subseteq L_m(G_i))$로 정의할 때 내고장성 강인 관리제어기는 다음과 같이 정의될 수 있다.

정의 2.1(내고장성 강인 관리제어기)[13] : G에 속한 각 성분모델 G_i에 대해 $L(S/G_i)=\overline{K_i}$와 $K_i\subseteq TF(G_i)$를 만족하는 $K_i\neq\emptyset$가 존재하는 경우 관리제어기 S를 내고장성 강인 관리제어기라고 한다

즉, 언어사양 K_i가 각 성분모델에 공통으로 속해있지 않더라도 각 성분모델들에 대한 내고장성 사건열에 포함되며 그에 따라 관리제어시스템이 동작하게 되는 경우 내고장성 강인 관리제어기라고 정의한다. 이때 다음의 명제는 내고장성 강인 관리제어기가 존재하기 위한 필요충분조건을 보여준다

명제 2.3[13] : 다중모델의 불확정성 이산사건시스템 $G:=\{G_1, G_2, \cdots, G_n\}$에 대해 $L(S/G_i)=\overline{K_i}$를 만족하는 내고장성 강인 관리제어기가 존재할 필요충분조건들은 다음과 같다 :

(A1) 모든 i에 대해 K_i는 $L(G_i)$에 대해 제어가능하고 관측가능한 언어이며,

(A2) $Ps_i=Ps_j$ $(i\neq j)$인 사건열 $s_i\in\overline{K_i}$, $s_j\in\overline{K_j}$에 대해 다음 관계식이 성립한다:

$$A_{K_i}(s_i)\cap IA_{K_j}(s_j)=A_{K_j}(s_j)\cap IA_{K_i}(s_i)=\emptyset.$$

위 명제에서 Ps_i, Ps_j는 사건열 s_i, s_j로부터 관측불가능한 사건을 제거하는 투영사상(projection mapping) $P: \Sigma^*\mapsto\Sigma_o^*$에 의해 투영된 사건열들이다[4]. 그리고 $A_{K_i}(s_i)$와 $IA_{K_j}(s_j)$는 다음과 같이 정의된다: $A_{K_i}(s_i):=\{\alpha\in\Sigma\mid s_i\alpha\in\overline{K_i}\}$, $IA_{K_j}(s_j):=\{\alpha\in\Sigma\mid s_j\alpha\in L(G_j)-\overline{K_j}\}$. 이때 조건 (A1)은 각 성분모델상에서 $L(S/G_i)=\overline{K_i}$를 만족하기 위해 기본적으로 만족되어야 할 조건이며, 조건 (A2)는 제어대상 시스템의 불확정성으로 인해 발생할 수 있는 충돌을 배제하기 위한 조건이 된다. 그러면 명제 2.3은 다음과 같이 분류될 수 있는 다중모델 강인 관리제어문제 2.3에 대한 하나의 해가 될 수 있다.

다중모델 강인 관리제어문제 2.3[13] : 주어진 하나의 언어사양 $K\subseteq\bigcup_{i=1}^{n}L_m(G_i)$에 대해 $\overline{K}=\bigcup_{i=1}^{n}L(S/G_i)$와 $L(S/G_i)\neq\emptyset$를 만족하는 하나의 강인 관리제어기가 존재할 조건은 무엇인가?

다음의 예에서 명제 2.3의 강인 관리제어이론에 대한 결과를 가스금속아크용접(GMAW: Gas Metal Arc Welding)을 수행하는 간단한 형태의 공정시스템에 적용해 보자.

[예][13] GMAW 공정에서는 일정한 속도로 공급되는 전극선을 아크발생을 통해 유도된 고온상태에서 녹여 가공대상이 되는 용재들을 접합하는 방식으로 용접공정을 수행한다. 가공되는 용재의 종류에 따라 용접을 시작하기 전에 용접조건을 설정하는데, 용접조건에는 용접용 토치(torch)와 용재 사이의 각인 토치각과 전극선과 용재 사이에 가해지는 전압 및 전류 값 등이 있다. 이때 가공되는 용재의 성질에 적합하지 않는 용접조건으로 가공이 이루어지는 경우 용접중에 생성되는 용융금속의 스패터링(spattering)에 의해 토치 끝부분이 막혀 전극선 공급에 장애를 유발하는 고장발생의 문제가 존재한다[23].

용재 1과 용재 2를 가공하는 하나의 GMAW 로봇으로 구성된 간단한 작업셀을 생각해 보자. $VA1, TA1$을 각각 용재 1을 가공하기 위해 적합한 전압 · 전류 조건과 토치각 조건이라고 하고, $VA2, TA2$를 각각 용재 2를 가공하기 위해 적합한 전압 · 전류 조건과 토치각 조건이라고 하자. 가공될 용재형태의 유사성으로 인해 용재의 종류를 감지하는 센서가 오동작 할 수 있다고 가정할 때, 공정에 대한 이산사건시스템 모델은 그림 1에서 보여지는 것처럼 다중모델의 집합 $G=\{G_1, G_2\}$로서 표현될 수 있다 여기서 G_1은 용재 1을 가공할 때의 시스템 모델이며 G_2는 용재 2를 가공할 때의 시스템 모델이다. 그림 1에서는 용접조건이 비정상적일 때 시스템에서 발생할 수 있는 오동작들의 여러 양상을 보여주고 있다.

사건들의 집합 Σ는 그림 1에서 보여지는 사건들로 구

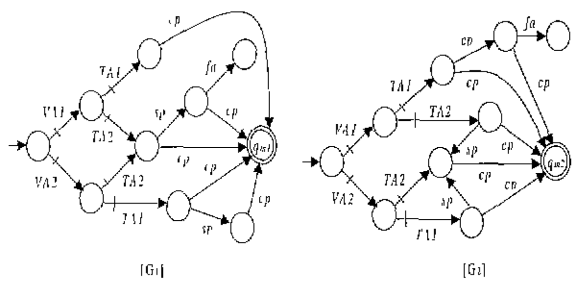

그림 1. 다중모델의 집합 $G=\{G_1, G_2\}$.

성되는데, 사건들의 의미는 표 1에서 설명되고 있다. 제어불가능한 사건들의 집합은 $\Sigma_{uc}=\{cp, sp, fa\}$이며, 관측불가능한 사건들의 집합은 $\Sigma_{uo}=\{sp, fa\}$로 주어진다.

표 1. 사건들의 의미.

사건	의 미
VA1	전압 · 전류 용접조건 *VA1*로 설정함
VA2	전압 · 전류 용접조건 *VA2*로 설정함
TA1	토치각 용접조건 *TA1*로 설정함
TA2	토치각 용접조건 *TA2*로 설정함
cp	용접이 성공적으로 끝남
sp	스패터링 고장 발생
fa	스패터링 제거 실패

이때 두 언어사양 K_1, K_2가 다음과 같이 주어졌다고 하자:

$$K_1 = K_2 = \{ VA2\ TA1\ cp,\ VA2\ TA1\ sp\ cp\} \subset \bigcup_{i=1}^{2} L_m(G_i)$$

간단한 대수적인 계산과정을 통해 K_1, K_2는 언어 $L(G_1)$, $L(G_2)$에 대해 각각 제어가능하며 관측가능한 언어임을 확인할 수 있다. 따라서 명제 2.3으로부터 각 G_i에 대해 $L(S/G_i)=\overline{K_i}$를 만족시키는 강인 관리제어기 S가 존재함을 알 수 있다. 이때 $K=K_1\cup K_2$라고 정의하면 다중모델의 불확정성 시스템 G를 위한 강인 관리제어기 $S: \Sigma_o^*\mapsto 2^\Sigma$는 다음과 같이 설계된다:

$$S(t)=\{\alpha\in\Sigma \mid s\alpha\in\overline{K},\ s\in\overline{K}\cap P^{-1}(t)\}.$$

즉, $S(t)$는 사건열 t가 관측되었을 때 관측가능한 사건 집합으로의 P사상이 t가 되는 사건열 $s\in\overline{K}$ 이후에 언어사양 $\overline{K}$에 속하는 사건들의 발생만을 허용한다.

3. 비결정성 이산사건시스템의 강인 관리제어

비결정성 이산사건시스템은 하나의 사건발생에 의한 상태천이에 의해서 서로 다른 몇 가지의 상태들로 천이가 가능한 시스템으로서 일반적으로 다음과 같은 ε천이가 존재하는 비결정성 오토마톤으로서 모델링된다(ε천이는 알려지지 않은 시스템 내부의 상태천이를 의미한다) :

$$G=(\Sigma\cup\{\varepsilon\}, Q, \delta, q_0, Q_m).$$

여기서 비결정성 상태천이함수는 다음과 같이 정의된다 :

$$\delta: (\Sigma\cup\{\varepsilon\})\times Q\mapsto 2^Q \ (2^Q\text{는 } Q\text{의 멱집합}).$$

비결정성 오토마톤 모델의 동작분석을 위해 동작모델(behavior model)이 필요한데, 언어모델로서 시스템의 동작이 완전하게 기술되는 결정성 이산사건시스템과는 달리 비결정성 이산사건시스템은 시스템 동작의 정확한 기술을 위해서 보다 세밀한 동작모델링 방식이 필요하다. 다음의 예를 보자.

[예] 그림 2에서 보여지는 비결정성 오토마톤 G를 고려하자.

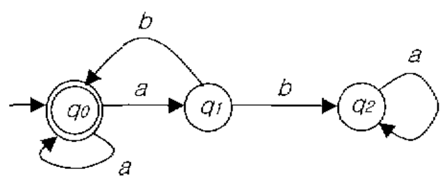

그림 2. 비결정성 시스템 G

상태 q_1에서 $\delta(b, q_1)=\{q_0, q_2\}$가 되는 비결정성 천이가 이루어지고 있다. 이때 비결정성 시스템 G의 동작에 대한 언어모델은 다음과 같이 기술된다:

$$L(G)=[ab+aba^*]^*.$$

하지만 이 언어모델 $L(G)$에서 사건열 ab는 $\delta(ab, q_0)=\{q_0, q_2\}$의 관계가 성립하여 시스템에서 하나의 정확한 상태를 가리키지 못한다. 즉 시스템에서 사건열 ab가 관측되었을 경우 시스템이 도달해 있는 상태에 대한 불확정성이 존재하게 된다.

앞의 예에서 보여진 비결정성 시스템의 동작에 대한 정확한 기술의 측면에서 언어모델이 가진 불완전성으로 인해 시스템 동작을 위한 새로운 모델링 방식들이 여러 연구가들에 의해 제안되었다. 궤적모델과 고장의 미론 모델이 대표적인 비결정성 이산사건시스템의 동작을 위한 모델링 방식들인데[15], 본 절에서는 관리제어이론 연구가들에 의해 주로 연구된 궤적모델 상에서의 비결정성 시스템의 관리제어이론에 대해 소개한다[16]-[19].

궤적(trajectory)이란 집합 $2^\Sigma\times(\Sigma\times 2^\Sigma)^*$에 속하는 하나의 원소로서 다음과 같이 표기된다:

$$t=(X_0, (\sigma_1, X_1), \cdots, (\sigma_{k-1}, X_{k-1}), (\sigma_k, X_k)).$$

위 식에서 σ_i는 i번째 실행사건(executed event)이며 X_i는 σ_i이후에 거부된(refused) 사건들의 집합으로서 i번째 거부(refusal)라고 한다. 궤적 t의 자국(trace)은 다음과 같이 정의된다:

$$tr(t)=\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_k.$$

모든 $i>0$에 대해 $\sigma_i \notin X_{i-1}$인 경우 궤적 t를 유효한 (valid) 궤적이라고 한다. 그리고 궤적 t가 $t=(X_0,(\sigma_1,X_1),\cdots,(\sigma_k,X_k))$의 형태로 주어졌을 때 궤적 t의 접두궤적(prefix trajectory) r은 $r<t$로 표기되며 다음과 같이 정의된다:

$$r=(X_0,(\sigma_1,X_1),\cdots,(\sigma_j,X_j)),\quad 0\le j\le k.$$

궤적 t의 모든 접두궤적들의 집합을 t의 접두닫힘(prefix closure)이라고 정의하고 $pref(t)$로 표기한다. 또한 궤적 r이 다음의 조건을 만족하게 되는 경우 궤적 t에 대해 지배된(dominated) 궤적이라고 하고 $r\sqsubseteq t$로 표기한다:

$$r=(Y_0,(\mu_1,Y_1),\cdots,(\mu_j,Y_k)),\quad \mu_i=\sigma_i,$$
$$Y_i\subseteq X_i,\ 0\le i\le k.$$

궤적 t에 의해 지배된 모든 궤적들의 집합을 t의 완성(completion) 혹은 지배닫힘(dominance-closure)라고 하고 $comp(t)$라고 표기한다. 이때 궤적 t의 닫힘(closure)은 $cl(t)$로 표기하고 다음과 같이 정의된다:

$$cl(t)=\bigcup_{v\in comp(t)} pref(v).$$

또한 임의의 궤적집합 T의 닫힌집합은 다음과 같이 정의된다:

$$cl(T)=\bigcup_{t\in T} cl(t).$$

궤적집합 T가 $cl(T)=T$를 만족하는 경우 닫힌(closed) 궤적집합이라고 정의한다. 또한 궤적집합 T가 다음의 조건을 만족하는 경우 포화된(saturated) 궤적집합이라고 부른다:

$$(\forall k=1,2,\cdots),\ (\forall j:\ 0\le j\le k),\ (\forall \sigma\in\Sigma-X_j)$$
$$[((X_0,(\sigma_1,X_1),\cdots,(\sigma_k,X_k))\in T\wedge(X_0,(\sigma_1,X_1),\cdots,$$
$$(\sigma_j,X_j),(\sigma,\varnothing))\notin T]$$
$$\Rightarrow(X_0,(\sigma_1,X_1),\cdots,(\sigma_j,X_j\cup\{\sigma\})\cdots(\sigma_k,X_k))\in T).$$

즉, 거부로서 나타날 수 없는 사건들을 포함하는 궤적들의 집합을 의미한다.

이러한 정의들을 바탕으로 $G_T\subseteq 2^{\Sigma}\times(\Sigma\times 2^{\Sigma})^*$인 닫힘성과 포화성을 동시에 가지는 궤적집합 G_T를 비결정성 이산사건시스템의 동작을 기술하는 궤적모델이라고 한다. 그리고 비결정성 모델 G_T의 자국들의 집합을 G_T의 언어라고 하며 $L(G_T)$로서 표기한다.

궤적 t에 대해 $t\sqsubseteq t'$, $t\neq t'$를 만족하는 궤적 t'이 존재하지 않은 경우 t를 지배적(dominant) 궤적이라고 정의하고, 궤적집합 T에서 모든 지배적 궤적들의 집합을 T의 지배집합(dominance-set)이라 부르며 $dom(T)$로 표기한다 비결정성 시스템의 동작모델 G_T는 $G_T=cl(dom(G_T))$가 성립하므로 그것의 지배집합에 의해 기술될 수 있다.

지금부터는 비결정성 시스템의 오토마타 모델과 궤적동작 모델과의 관계에 대해 알아본다. 주어진 하나의 비결정성 오토마톤에 대한 궤적동작 모델을 얻기 위해 먼저 각 상태 $q\in Q$에 대해 최대거부집합(maximal-refusal-set) $X_q\subseteq\Sigma$를 다음과 같이 정의한다:

$$X_q=\{\sigma\in\Sigma\mid(\forall q'\in\varepsilon^*(q))\ \delta(\sigma,q')=\varnothing\}.$$

위 식에서 $\varepsilon^*(q)$는 다음과 같이 정의된다:

$$q\in\varepsilon^*(q),$$
$$q'\in\varepsilon^*(q)\rightarrow\delta(\varepsilon,q')\subseteq\varepsilon^*(q).$$

비결정성 오토마톤 G의 경로(path) $p=(q_0,\sigma_1,q_1,\cdots,\sigma_k,q_k)$에 대해 다음과 같은 방식으로 하나의 궤적 t_p를 구한다(σ_i는 ε일 수도 있다). 먼저 p에 있는 각 상태 q_i를 최대거부집합 X_{q_i}로 대체하면 $\tilde{t}_p=(X_{q_0},(\sigma_1,X_{q_1}),\cdots,(\sigma_k,X_{q_k}))$인 궤적을 구할 수 있고, $\tilde{t}_p$에서 ε을 제거하고 그에 관련된 모든 거부집합의 합연산(union)에 의해서 새로운 궤적 t_p를 얻게 된다. 이러한 과정을 통해 얻어진 G의 모든 경로에 대한 궤적들의 집합을 $M(G)$라고 하면 다음과 같은 궤적집합 $T(G)$를 얻을 수 있다:

$$T(G)=cl(M(G)).$$

상태 q가 $\varepsilon^*(q)=\{q\}$를 만족하는 경우 ε-안정한(ε-stable) 상태라고 하며 하나의 경로 $p=(q_0,\sigma_1,q_1,\cdots,\sigma_k,q_k)$에서 모든 상태 q_k가 ε-안정하면 그 경로는 ε-안정하다고 부른다. $T(G)$에서 ε-안정한 경로들에 대한 궤적들의 집합은 $T(G)$의 지배집합 $dom(T(G))$와 같다. 반대로 주어진 궤적모델 $T(G)$에 대해 ε 천이를 가지는 비결정성 오토마타 G를 얻는 알고리즘이 [16]-[19]에 나타나 있다.

G의 궤적모델 $T(G)$ 중에서 표기궤적(marked trajectory)들의 집합은 다음과 같이 정의된다:

$$T_m(G)=\{\ t_p\in T(G)\mid \text{경로 } p\text{가 } Q_m\text{에 속하는 표기상태에서 끝남}\}.$$

지금까지 비결정성 시스템의 동작을 위한 궤적모델링 방식과 비결정성 오토마톤과의 관계에 대하여 간략히 소개하였다. 다음의 간단한 예를 통해서 궤적모델에 대한 앞의 개념들을 살펴보자.

[예] 그림 3에 주어진 비결정성 오토마톤 모델 G를

생각해 보자.

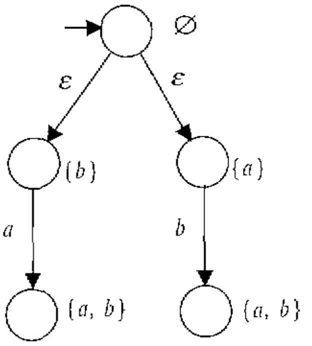

그림 3. G.

시스템의 각 상태는 거부사건들의 집합으로 표기되고 있다. 여기서 G의 모든 경로들에 대한 궤적들의 집합은 $M(G) = pref(t_{p_1}, t_{p_2})$로서 궤적 t_{p_1}, t_{p_2}는 다음과 같이 표현될 수 있다 : $t_{p_1} = (\{b\}, (a, \{a, b\}))$, $t_{p_2} = (\{a\}, (b, \{a, b\}))$ 따라서 비결정성 오토마톤 G에 대한 궤적 모델은 $T(G) = cl(M(G))$로서 다음과 같이 계산되어 진다:

$$T(G) = [\bigcup t \in comp(pref(\{b\}, (a, \{a, b\})))\ pref(t)] \cup$$
$$[\bigcup t \in comp(pref(\{a\}, (b, \{a, b\})))\ pref(t)].$$

즉, $(\{b\})$, $(a, (b, \{a\}))$, $(a, (b, \varnothing))$와 같은 궤적들이 $T(G)$에 포함됨을 알 수 있다.

지금부터는 궤적모델 상에서의 비막힘성 관리제어문제에 대한 연구결과들을 소개한다. 궤적모델 상에서의 관리제어기 설계방법에는 크게 두 가지 방식이 있는데, 하나는 우선동기합성(PSC: Prioritized Synchronization Composition)[16], [17] 방식이고 다른 하나는 리프팅(lifting) 알고리즘[18], [19]을 이용한 방식이다.

먼저 PSC를 이용한 관리제어기 설계문제에 대해 알아보자. PSC는 시스템과 관리제어기의 상호영향에 의한 폐루프(closed-loop) 시스템의 동작을 기술하기 위한 연산으로서 기존의 관리제어기 설계와는 달리 시스템과 관리제어기에 각각 우선 사건들(priority events)의 집합이 주어진다. PSC에 의해 상호 연결된 시스템에서 하나의 사건이 발생했다면 그 사건에 대해 우선권을 지닌 각 부시스템들(subsystems)에서 발생했음을 의미하게 된다. 일반적으로 집합 A는 시스템의 우선사건집합을 B는 관리제어기의 우선사건집합을 나타내는 표기로 다음과 같이 Σ_c, Σ_{uc}, Σ_d의 합(disjoint union)으로 정의된다 :

$$A = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc},\quad B = \Sigma_c \cup \Sigma_d \quad (\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{uc} \cup \Sigma_d).$$

여기서 Σ_d는 유도(driven) 사건들의 집합을 나타낸다. 다음 정의 3.1은 시스템과 관리제어기의 PSC로부터 하나의 관리제어시스템을 정의한다.

정의 3.1 (PSC)[15]-[17] : 각각의 우선사건집합 A, B를 가진 시스템과 관리제어기의 오토마톤을 $G = (Q_G, \Sigma, \delta_G, q_{0,G}, Q_{m,G})$, $S = (Q_S, \Sigma, \delta_S, q_{0,S}, Q_{m,S})$라고 하면, G와 S의 PSC는 다음과 같이 정의되는 또 하나의 비결정성 오토마톤이다 :

$$G_{A\|B}S = (Q, \Sigma, \delta, q_0, Q_m),$$

이기서 상태집합은 $Q = Q_G \times Q_S$, 초기상태는 $q_0 = (q_{0,G}, q_{0,S})$, 표기상태집합은 $Q_m = Q_{m,G} \times Q_{m,S}$이며 $\delta : (\Sigma \cup \{\varepsilon\}) \times Q \mapsto 2^Q$는 상태천이함수로서 다음과 같이 정의된다: $\forall q = (q_g, q_s)$, $\forall \sigma \in \Sigma$.

$\delta_G(\sigma, q_g) \neq \varnothing$, $\delta_S(\sigma, q_s) \neq \varnothing$인 경우 $\delta(\sigma, q)$:

$$= \delta_G(\sigma, q_g) \times \delta_S(\sigma, q_s),$$

$\delta_G(\sigma, q_g) \neq \varnothing$, $\sigma \in R_S(q_s)$, $\sigma \notin B$인 경우 $\delta(\sigma, q)$:

$$= \delta_G(\sigma, q_g) \times \{q_s\},$$

$\delta_S(\sigma, q_s) \neq \varnothing$, $\sigma \in R_G(q_g)$, $\sigma \notin A$인 경우 $\delta(\sigma, q)$:

$$= \{q_g\} \times \delta_S(\sigma, q_s),$$

그 이외의 경우 $\delta(\sigma, q) := \varnothing$ 이며,

$$\delta(\varepsilon, q) := [\delta_G(\varepsilon, q_g) \cup \{q_g\}] \times$$
$$[\delta_S(\varepsilon, q_s) \cup \{q_s\}] - \{(q_g, q_s)\}$$ 이다.

위 식에서 R_G는 $R_G(q) := \{\sigma \in \Sigma \mid \delta_G(q', \sigma) = \varnothing, \forall q' \in \varepsilon^*(q)\}$이며 R_S에 대해서도 같은 정의가 적용된다. 위의 상태천이함수가 의미하는 것은 하나의 사건이 G와 S의 각 상태에서 모두 정의되는 경우 PSC 오토마톤에서도 정의되며, 시스템에서 정의되지만 관리제어기에서 정의되지 않은 경우 관리제어기의 우선사건집합 B에 속하지 않는 사건이어야만 PSC에서도 정의됨을 의미하고 있다. 그 반대의 경우에도 같은 설명이 이루어질 수 있다.

PSC를 바탕으로 비결정성 시스템을 위한 궤적모델 비막힘성 관리제어기(trajectory model nonblocking supervisor)는 다음과 같이 정의된다.

정의 3.2 (궤적모델 비막힘성 관리제어기)[17], [18] : 다음의 관계식이 만족하는 경우 관리제어기 S를 시스템 G에 대한 궤적모델 비막힘성 관리제어기라고 한다:

$$T(G_{A\|B}S) = pref(T_m(G_{A\|B}S)).$$

궤적모델 비막힘성 관리제어기는 [1]-[3]에 소개된 언어모델 의미에서의 비막힘성 관리제어기가 된다. 다음

명제 3.1은 주어진 언어사양에 대한 궤적모델 비막힘성 관리제어기가 존재하기 위한 필요충분조건을 보여준다.

명제 3.1[17] : 주어진 언어사양 $K \subseteq L_m(G)$에 대해 $L_m(G_{A\|B}S) = K$를 만족하는 비막힘성 관리제어기 S가 존재하기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

(A1) $\overline{K} \cap L_m(G^{\Sigma-A}) = K$,

(A2) $\overline{K}(A-B) \cap L(G^{\Sigma-A}) \subseteq \overline{K}$,

(A3) $T(G_{A\|B}det(\overline{K})) = pref(T_m(G_{A\|B}det(\overline{K})))$.

위 식에서 $det(\overline{K})$는 언어 $\overline{K}$를 생성하는 최소 상태개수를 가진 결정성 오토마톤이다. 이때 $det(\overline{K})$의 모든 상태들은 표기상태라고 가정한다. $G^{\Sigma-A}$는 $\Sigma-A$에 대한 G의 부가(augmented) 오토마톤으로서 $G^{\Sigma-A} := G_{\emptyset\|\emptyset}(\Sigma-A)$로 정의된다 ($(\Sigma-A)$는 사건집합 $\Sigma-A$에 속한 모든 사건들에 대해 자기루프(self-loop)를 가지는 하나의 표기상태만을 가진 결정성 오토마톤을 의미한다)[16], [17]. 즉, $G^{\Sigma-A}$는 오토마톤 G의 각 상태에 대해 G에서 정의되지 않으며 $\Sigma-A$에 속한 사건들에 의해 자기루프가 형성된 오토마톤이다. 위 명제에서 (A1), (A2)는 언어사양 $\overline{K}$가 오토마톤 $G^{\Sigma-A}$에 대해 $L_m(G^{\Sigma-A})$닫힘성과 $A-B$에 대한 제어가능성을 각각 만족해야 함을 의미하며, (A3)는 궤적모델 상에서 닫힘성을 만족해야함을 의미한다. $det(\overline{K})$는 추후에 설계될 관리제어기의 결정성 오토마톤으로 간주될 수 있다.

다음의 단순화된 생산시스템의 작업셀에 대한 이산사건모델을 통해 앞의 이론적인 결과들의 의미를 재조명해보자.

[예][17] 그림 4(a)은 컨베이어로부터 입력된 부품을 가공하는 하나의 시스템에 대한 결정성 이산사건모델을 나타낸다. 두 종류의 부품이 입력되며 부품의 폭이 유사하다고 가정한다. 사건 a_1, a_2는 부품 1과 부품 2가 각각 시스템에 도착하는 것을 나타내는 사건이라 하고, 사건 b_1과 b_2는 입력된 부품이 부품 1과 부품 2의 가공을 위해 적합한 가이드 셋(guide set)을 가지고 시스템 내부로 입력되는 사건을 의미한다. 입력된 부품의 종류에 적절한 가이드 셋으로 시스템에 입력된 부품들은 가공을 무사히 끝내지만 (사건 c), 도착된 부품 2가 부품 1에 적합한 가이드 셋으로 입력되는 경우 막힘 사건

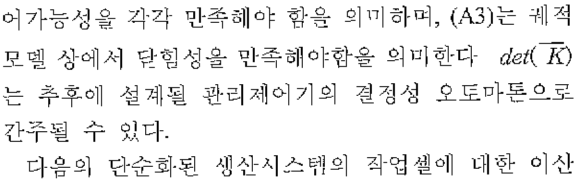

그림 4. 단순화된 생산시스템의 오토마타 모델들.

d가 발생하는 것으로 가정한다. 여기서 a_1, a_2, c, d는 제어불가능한 사건으로 분류될 수 있다. 본 예에서는 시스템에 도착하는 부품의 종류를 구분하는 센서가 없는 상황을 고려한다. 이런 경우 두 사건 a_1, a_2는 외부 제어기에 의해 부품의 도착만을 의미하는 하나의 사건 a로만 인식된다. 이러한 가정하에서 시스템은 그림 4(b)에서 보여지는 것처럼 비결정성 오토마톤으로 모델링 될 수 있는데, 기존의 [1]-[4]에서 소개된 결정성 시스템을 위한 관리제어기법은 대상 시스템의 비막힘성을 보장할 수 있는 관리제어기 설계방법을 제공하지 못한다. 보다 구체적으로 이 상황을 살펴보자. 언어모델의 의미에서 보면 그림 4(b)에서의 비결정성 시스템에 대한 비막힘성 관리제어기가 존재한다. 즉, 사건 a의 발생 이후 사건 b_1의 발생을 억제(disable)하는 관리제어기 S를 설계하게 되면 다음과 같은 관계식이 성립하게 된다.

$$L_m(S/G) = (ab_2c)^*, \quad L(S/G) = \overline{L_m(S/G)} = \overline{(ab_2c)^*}.$$

즉, S는 언어모델 의미에서의 비막힘성 관리제어기가 된다[1]-[4]. 하지만 그림 4(c)에서 보여지는 것처럼 S에 의해 제어된 시스템은 막힘성이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 언어모델 의미상에서 관리제어기에 대한 비막힘성은 비결정성 시스템에서 적절하지 못함을 알 수 있다. 이 문제를 궤적모델과 PSC를 이용하여 해결해 보자.

먼저 시스템과 관리제어기에 대한 우선사건들의 집합을 다음과 같이 각각 A, B로 주어진다고 가정하자: $A = \{a, b_1, c, d\}$, $B = \{b_1, b_2\}$. PSC에 기반한 관리제어기가 언어사양 $K_1 = (ab_2c)^*$을 만족하면서 시스템의 비막힘성을 보장할 수 있는지 살펴보자. K_1은 명제 3.1의 두 조건 (A1)과 (A2)를 만족시킨다. 조건 (A3)이 만족되는지 확인하자. 결정성 오토마톤 $det(\overline{K_1})$은 그림 5(a)에 보여지며 그림 4(b)에서 보여지는 G와의 PSC $G_{A\|B}det(\overline{K_1})$은 그림 5(b)에서 보여진다. 그림 5(b)의 비결정 오톤마톤의 궤적들에 대해 다음의 관계가 성립함을 알 수 있다.

$$(\emptyset, (a, \emptyset), (b_2\{c\})) \in T(G_{A\|B}det(\overline{K_1})) - pref(T_m(G_{A\|B}det(\overline{K_1})))$$

따라서 조건 (A3)이 만족되지 않음을 알 수 있다. 그러므로 언어사양 K_1에 대한 궤적모델 비막힘성 관리제어기는 존재하지 않는다. 물론 언어모델 의미에서의 비막힘성 관리제어기는 존재하지만 앞서 언급했듯이 폐루프 시스템에서는 막힘성이 존재하게 된다.

다른 언어사양 $K_2 = (ab_2(\epsilon + b_1)c)^*$가 주어진 경우에

대해 살펴보자. K_2는 (A1)과 (A2)를 만족함을 쉽게 확인할 수 있고, $det(\overline{K_2})$는 그림 5(c)에서 보여지며 G와의 PSC $G_{A\|B}det(\overline{K_2})$는 그림 5(d)에 보여진다. 간단한 계산을 통해 $G_{A\|B}det(\overline{K_2})$는 조건 (A3)를 만족함을 확인할 수 있다. 따라서 명제 3.1에 의해 K_3에 대한 궤적모델 비막힘성 관리제어기 S가 존재함을 알 수 있으며, 그것은 $S=det(\overline{K_3})$임을 쉽게 알 수 있다.

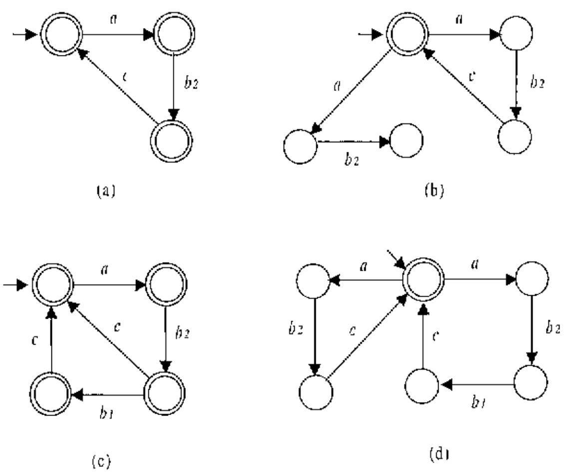

그림 5. 궤적모델과 PSC를 위한 오토마타 모델들.

지금까지 소개한 PSC와는 달리 [18], [19]에서는 기존의 부분관측 결정성 이산사건시스템에 대한 관리제어기 설계기법을 비결정성 시스템의 관리제어기 설계문제에 적용하였다. 즉, 비결정성 시스템의 오토마톤 모델 G에 대해 오토마타사양(automata specification) G_s가 주어졌을 경우 $S/G=G_s$를 만족하는 관리제어기 S의 설계문제를 다루고 있다. 여기서 관리제어기 S는 [1]-[4]의 기존 결과들에서 정의된 것으로서 G에서 발생하는 사건열들을 관측하여 제어가능한 사건들을 허용 혹은 억제하는 기능을 수행한다.

먼저 비결정성 오토마톤 G를 그림 6에서 보여지는 확장(extend) 알고리즘을 이용하는 리프팅(lifting) 절차를 통해 부분관측하의 결정성 오토마톤 $\tilde{G}$로 변환한다. 그림 6에서 보여지는 사건 $\sigma_1, \cdots, \sigma_n$은 가상의 관측불가능한 사건들이며 상태 q_ε 역시 가상의 상태이다.

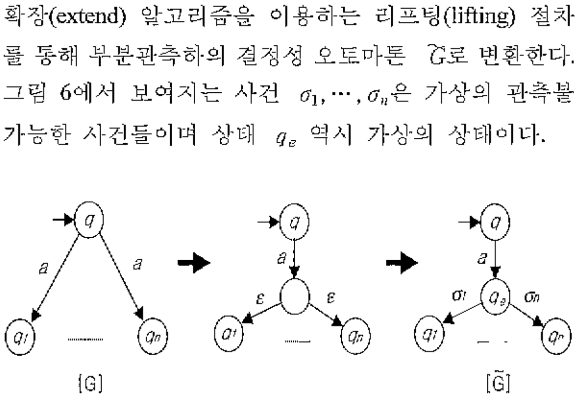

그림 6. 확장 알고리즘.

$\tilde{G}$의 상태집합을 $\tilde{Q}$, 오토마타사양 G_s의 상태집합을 Q_s로 표기할 때 다음의 상태집합을 정의하자: $\tilde{Q}_b := (Q-Q_s) \cup \{\tilde{q} \in \tilde{Q}-Q \mid \delta(\varepsilon, \tilde{q}) \subseteq (Q-Q_s)\}$. 또한 이를 바탕으로 언어사양을 다음과 같이 정의하자:

$$E := \{s \in L_m(\tilde{G}) \mid (\forall s' \leq s)\ \tilde{\delta}(s', q_0) \in \tilde{Q}-\tilde{Q}_b\}$$

그러면 다음 명제 3.2는 위의 언어사양 E를 결정성 오토마톤 $\tilde{G}$의 언어모델 분석을 통해서 원래의 비결정성 시스템의 오토마톤 G에 대한 궤적모델 비막힘성 관리제어기의 존재조건에 대한 결과를 보여준다.

명제 3.2[19] : $S/G=G_s$를 만족하는 궤적모델 비막힘성 관리제어기 S가 존재하기 위한 필요충분조건은 언어사양 E가 $L(\tilde{G})$에 대해 제어가능하며 또한 관측가능한 성질을 갖는 것이다.
즉, 결정성 언어모델 상에서 오토마톤사양에서 생성되는 사양언어가 기존의 관측가능성 및 제어가능성 조건을 만족하게 되면 원래의 비결정성 시스템에서 앞서 정의된 궤적모델 의미에서도 비막힘성을 보장하는 관리제어기가 존재함을 알 수 있다. 위의 결과는 일종의 금지상태문제(forbidden state problem)에 대한 해로서 [18], [19]에서는 정적사양(static specification)문제로 분류하고 있다. 이와 더불어 [18], [19]에서는 동적사양(dynamic specification)문제도 소개하고 있는데, 이는 앞선 정적사양 문제에서 소개된 방법을 확대적용하고 있어 본 논문에서는 생략한다.

지금까지 비결정성 시스템에 대한 관리제어이론을 궤적모델링을 이용한 시스템 동작해석 기법에 적용한 연구결과들을 소개하였는데, 언어모델에 비해 시스템 동작에 대해서 보다 정확하게 기술하는 기법임을 확인하였다. 그러나 한편으로 모델링의 복잡성과 해석의 복잡성 문제가 대두되고 있음을 알게되었다. 또한 비막힘성 관리제어기 설계문제에서 어떤 형태의 시스템의 경우에는 궤적모델 의미에서 비막힘성 관리제어기가 존재하더라도 실제 제어된 시스템에서는 막힘성이 존재하는 경우가 발생함을 알 수 있었다. 서두에 소개한 그림 2의 비결정성 오토마타를 관리제어된 시스템 S/G라고 하자 (PSC 프레임 상에서는 $S_{A\|B}G$) 이때 S/G의 궤적 모델인 $T(S/G)$와 $T_m(S/G)$사이에는 다음과 같은 관계식이 성립하고 있음을 쉽게 확인할 수 있다: $T(S/G)=pref(T_m(S/G))$. 즉, S는 앞선 정의에 따라 궤적모델 비막힘성 관리제어기이다. 그러나 그림 2에서 나타나는 것처럼 S/G는 상태 q_2에서 막힘성이 발생함을 알 수 있다.

이러한 궤적모델의 복잡성과 특정 시스템의 경우에는 적용될 수 없는 비막힘성 관리제어의 문제를 해결하기 위해서 [21]에서는 언어모델에 기반하여 임의의 비결정성 시스템에 대한 비막힘성 관리제어문제를 다루

고 있다. 지금부터 간략하게 [21]의 결과를 소개한다.

먼저 비결정성 시스템 G를 주어진 언어사양 $K(\subseteq L_m(G))$에 대해 [21]에서 정의된 동등관계에 있는 ($G\equiv_K\tilde{G}$로 표기되는) 다중 결정성모델(multiple deterministic model)의 집합 $\tilde{G}=\{\tilde{G}_1, \tilde{G}_2, \cdots, \tilde{G}_n\}$으로 분할하는데, 이때 다음의 관계식이 항상 성립한다 [21]:

$$\overline{K} = \bigcup_{i=1}^{n}(L(\tilde{G}_i)\cap\overline{K}).$$

아래 그림 7은 그림 4(b)의 비결정성 시스템 G에서 언어사양 $K=\{ab_1c\}$에 대해 G와 동등관계에 있는 다중 결정성모델의 집합 $\tilde{G}$의 한 예를 보여 준다.

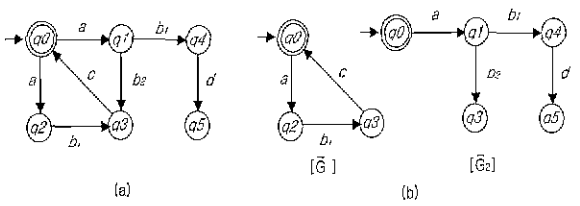

그림 7. (a) G (b) $\tilde{G}=\{\tilde{G}_1, \tilde{G}_2\}$.

이때 다중 결정성모델의 집합 $\tilde{G}$에 대한 비막힘성 관리제어기를 다음과 같이 정의한다.

정의 3.2 (다중모델 비막힘성 관리제어기)[21] : $G\equiv_K\tilde{G}$를 만족하는 다중 결정성 모델집합 $\tilde{G}$에 대해 다음의 관계식이 만족될 때 관리제어기 S를 다중모델 비막힘성 관리제어기라고 한다 :

$$\bigcup_{i=1}^{n}L(S/\tilde{G}_i)=\overline{K},\ \overline{L_c(S/\tilde{G}_i)\cap K}=L(S/\tilde{G}_i).\ \forall\tilde{G}_i\in\tilde{G}$$

위 정의 3.2를 바탕으로 다음 명제 3.3은 $\tilde{G}$에 대한 비막힘성 관리제어기가 존재할 조건을 보여준다.

명제 3.3[21] : 모든 $\tilde{G}_i\in\tilde{G}$에 대해 다음의 조건들은 $\tilde{G}$와 언어사양 K에 대한 다중모델 비막힘성 관리제어기가 존재할 필요충분조건들이다:

(A1) $\overline{L_m(\tilde{G}_i)\cap K} = L(\tilde{G}_i)\cap\overline{K}$,

(A2) $\overline{K}\Sigma_{uc}\cap L(\tilde{G}_i) \subseteq \overline{K}$.

조건 (A1)은 $s\in L(\tilde{G}_i)$, $s\in\overline{K}$인 사건열 s에 대해 $st\in L_m(\tilde{G}_i)$, $st\in K$인 사건열 t가 결정성 오토마톤 $\tilde{G}_i$에서 항상 존재함을 의미하며, (A2)는 K가 각 $\tilde{G}_i$에 대해 제어가능한 언어임을 나타내고 있다.

[21]에서는 원래의 비결정성 오토마타 G에 대한 비막힘성 관리제어기를 다음과 같은 막힘성(get blocked)의 개념을 이용하여 정의하고 있다.

정의 3.3(막힘성)[21] : 관리제어기 S에 의해 제어된 비결정성 시스템의 오토마톤 G에 대해 다음의 관계식이 성립할 때 G는 S에 의한 막힘성을 가진다고 한다: 모든 사건열 $u\in L_G(q)\cap(L(S/G)/t)$에 대해 $\delta(u, q)\cap Q_m=\emptyset$이 되는 사건열 $t\in L(S/G)$와 상태 $q\in\delta(t, q_0)$가 G에 존재한다. 그리고 막힘성이 존재하지 않는 경우 S를 비막힘성 관리제어기라고 정의한다.

위 정의 3.3에서 $L_G(q)$는 G의 상태 q에서 시스템에서 발생가능한 모든 사건열들의 집합을 의미하며, 언어 $L(S/G)/t$는 $ts\in L(S/G)$를 만족하는 사건열 s들의 집합이다. 마지막으로 다음 명제 3.4는 다중모델 비막힘성 관리제어기가 원래의 비결정성 시스템에 대해 비막힘성을 보장하는 관리제어기임을 보여준다.

명제 3.4[21] : 비결정성 시스템 G와 언어사양 K에 대해 동등관계에 있는 다중 결정성모델의 집합 $\tilde{G}$에 대해 S가 다중모델 비막힘성 관리제어기이면 S는 G에 대한 비막힘성 관리제어기이고 그 역의 관계도 성립한다.

위 명제 3.4는 다중 결정성모델의 집합이 언어 K에 대해 원래의 비결정성 시스템과 동등한 동작을 보인다는 점을 이용하여 쉽게 증명될 수 있다. 또한 다중 결정성 모델집합에 대한 다중모델 비막힘성 관리제어기가 집합내의 모든 결정성 모델들에 대해 비막힘성을 보장하므로 원래의 비결정성 시스템에 대해서도 비막힘성을 보장할 수 있음을 직관적으로 이해할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 이산사건시스템의 관리제어 (I): 이산사건모델링 및 관리제어이론[3]에서 소개한 개념들을 바탕으로 모델 불확실성이 존재하는 이산사건시스템의 강인 관리제어이론에 대한 연구결과들을 소개하였다. 이산사건시스템에서 모델 불확정성은 다중모델 시스템과 비결정성 시스템의 두 가지 형태로 기술될 수 있으며 본 논문에서는 각 형태의 관리제어문제들과 관리제어기 설계기법들을 소개하였다.

실제 이산사건시스템에서의 모델 불확정성의 형태는 본 논문에서 소개한 다중모델과 비결정성 형태로만 기술될 수 있을 것으로 기대되지는 않는다. [22]에서는 시스템 내부의 상태천이 동작에 대한 불확실한 정보하에서 시스템의 불확정성을 모델링하는 새로운 방법을 제안하고 있는데, 이를 포함하는 보다 포괄적이며 일반적인 형태의 불확정성 모델에 대한 연구가 앞으로 필요한 것으로 예견된다. 또한 기존의 결과들을 실제시스템에 적용하기 위한 응용기술의 연구가 필요한데, [14]에서 보인 간단한 형태의 생산시스템 작업셀에 적용된 강인 관리제어기법을 보다 실제적인 시스템에 적용하기 위한 연구가 필요한 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] 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.

[2] W. M. Wonham and P. J. Ramadge, "On the supremal controllable sublanguage of a given language", *SIAM J. of Control and Optimization*, vol. 25, pp. 637-659, 1987.

[3] 조 광현, 임 종태, "이산사건시스템의 관리제어 (I): 이산사건모델링 및 관리제어이론", 제어 · 자동화 · 시스템공학회지, 제6권, 제3호, pp. 68-81, 2000.

[4] F. Lin and W. M. Wonham, "On observability of discrete-event systems", *Information Science*, vol. 44, no. 3, pp 173-198, 1988

[5] F. Lin, "Robust and adaptive supervisory control of discrete event systems", *IEEE Trans on Automatic Control*, vol. 38, no. 12, pp. 1848-1852, 1993.

[6] S. Young and V. K. Garg, "Model uncertainty in discrete event systems", *SIAM J. of Control and Optimization*, vol. 33, no. 1, pp. 208-226, 1995.

[7] J. E. R. Cury and B H. Krogh, "Robustness of supervisors for discrete event systems", *IEEE Trans on Automatic Control*, pp. 376-379, 1999.

[8] S. Takai, "Robust supervisory control of a class of timed discrete event systems under partial observation", *Systems and Control Letters*, vol. 39, pp. 267-273, 2000.

[9] K.-H Cho and J -T. Lim, "Stability and robustness of discrete event dynamic systems", *Inter J of Systems Science*, 1997.

[10] M. Sampath, R. Sengupta, S. Lafortune, K. Sinnamohideen, and D Teneketzis, "Diagnosability of discrete-event systems", *IEEE Trans on Automatic Control*, vol. 40, no 9, pp.1555-1575, 1995.

[11] M. Sampath, S. Lafortune, and D. Teneketzis, "Active diagnosis of discrete-event systems", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 43, no. 7, pp.908-929, 1998.

[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.

[13] S.-J Park and J.-T. Lim, "Robust and fault-tolerant supervisory control of discrete event systems with partial observation and model uncertainty", *Inter. J of Systems Science*, vol. 29, no. 9, pp. 953-957, 1998.

[14] S.-J. Park and J.-T. Lim, "Fault-tolerant robust supervisor for discrete event systems with model uncertainty and its application to a workcell", *IEEE Trans. on Robotics and Automation*, vol. 15, no. 2, pp.386-391, 1999.

[15] M. Heymann, "Concurrency and discrete event control", *IEEE Control Systems Magazine*, pp.103-112, 1990.

[16] M. A. Shayman and R. Kumar, "Supervisory control of nondeterministic systems with driven events via prioritized synchronization and trajectory models", *SIAM J. of Control and Optimization*, vol. 33, no. 2, pp. 469-497, 1995.

[17] R. Kumar and M. A. Shayman, "Nonblocking supervisory control of nondeterministic systems via prioritized synchronization", *IEEE Trans on Automatic Control*, vol. 41, no. 8, pp. 1160-1175, 1996.

[18] M. Heymann and F. Lin, "Nonblocking supervisory control of nondeterministic systems", *Technion CIS Rep.* 9620, Oct 1996.

[19] M. Heymann and F. Lin, "Discrete-event control of nondeterministic systems", *IEEE Trans on Automatic Control*, vol. 43, no. 1, pp. 3-17, 1998.

[20] A Overkamp, "Supervisory control using failure semantics and partial specification", *IEEE Trans. on Automatic Control*, vol. 42, no. 4, pp. 498-510, 1997.

[21] S.-J. Park and J.-T. Lim. "Nonblocking supervisory control of nondeterministic systems based on multiple deterministic model approach", *IEICE Information and Systems*, to appear, 2000

[22] S.-J. Park and J -T. Lim, "Robust and nonblocking supervisor for discrete event systems with model uncertainty and partial observation", *IEEE Trans on Automatic Control*, to appear, 2000.

[23] G. E. Cook, "The application of microcomputers in automated arc welding systems", *IEEE Trans on Industry Applications*, vol IA-17, no. 6, pp. 619-625, 1981.

박 성 진

1994년 한국과학기술원 전기및전자공학과 졸업. 동대학원 석사 (1997), 현재 동대학원 박사과정. 관심분야는 supervisory control of discrete event systems, congestion control of communication networks, control and automation of manufacturing systems, semiconductor manufacturing systems, power protection systems, ATM networks 등.

조 광 현
제어 · 자동화 · 시스템 공학회지 제6권 제3호 참조. 현재 울산대학교 전기전자 및 자동화공학부 전임강사

임 종 태
제어 · 자동화 · 시스템 공학회지 제4권 제4호 참조. 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 교수.