

계층적 관리제어

박성진\*, 조광현\*\*, 임종태\*

\*한국과학기술원 전기 및 전자공학부, \*\*울산대학교 전기전자 및 자동화공학부

**Abstract :** 본 논문에서는 계층적 구조를 가진 이산사건시스템의 관리제어이론에 대해 알아본다. 특히 하위레벨(low level)과 상위레벨(high level)로 구성된 계층적 구조의 이산사건시스템에서 레벨들 사이의 정보전달을 바탕으로 상위레벨에서 설정된 사양을 만족시키기 위한 상위레벨 및 하위레벨의 관리제어기 설계기법을 소개한다. 계층적 구조에서 관리제어목적은 계층적 일치성의 개념으로 정의되는데, 이것은 설계된 하위레벨 관리제어기에 의해 제어된 하위레벨 이산사건시스템의 동작에 대한 상위레벨로의 정보사상이 주어진 상위레벨의 사양과 일치함을 의미한다. 본 논문에서는 상위레벨 상에서 입의의 사양이 주어질 때 계층적 일치성을 만족하게 하는 관리제어기가 존재하기 위한 계층적 이산사건시스템의 동작특성과 레벨들 사이에서의 정보전달의 특성을 소개한다. 또한 설계된 관리제어기를 포함하는 전체 관리제어시스템에서 계층적 일치성 및 비막힘성의 동시만족에 관한 관리제어문제를 소개한다.

1. 서론

시스템의 계층적 구조는 복잡한 작업을 수행하는 동적시스템의 제어에서 일반적으로 나타나는 특성이다. 복잡한 구조를 가지고 있으며, 또한 복잡한 작업을 수행하는 시스템의 효과적 제어수단으로 분산(distributed or decentralized) 제어방식이 연구되어져 왔는데 이는 개념적으로 작업을 수평차원(horizontal dimension)으로 분할하는 방식이다[7]-[10]. 반면 계층 제어방식은 분산 제어방식과는 달리 수직차원(vertical dimension)으로 분할가능한 작업에서 제어목적을 달성하고자 하는 경우에 적합하다. 이산사건시스템의 프레임(frame) 상에서 이러한 계층적 구조를 가지는 시스템에 대한 관리제어이론이 지금까지 여러 연구가들에 의해 다방면으로 개발되어져 왔다[3]-[6]. 특히 [3]에서는 기존 시스템의 계층적 구조를 이산사건시스템의 프레임 상에서 새롭게 정의하였는데, 이는 계층적 일치성(hierarchical consistency)의 개념 및 이의 달성을 위한 계층적 관리제어의 정형화된 문제를 최초로 제안한 것이다. 이후의 계층적 관리제어이론에서 연구의 주된 흐름은 [3]에서 소개된 이산사건시스템 계층구조와 제어문제에 바탕을 두고 있다. 특히 [4]에서는 제어구조(control structure)의 개념을 바탕으로 [3]에서 제안된 계층적 일치성을 포함한 여러 개념들을 일반화시키고 있는데, [3]과는 달리 관리제어기 설계문제까지는 다루고 있지 않다. 또한 [5]에서 이산사건시스템의 계층적 관리제어이론은 계층적 상태기계(hierarchical state machines)로 모델링되는 시스템에서 상태도달의 문제(reachability problem)를 다루는데 시스템의 의도된 궤적(desirable trajectories)을 표현하는 언어

사양을 만족시키기 위한 기본적인 관리제어문제를 다루고 있지는 않다. [6]에서는 상태기계(state machines)상에서 격자이론(lattice theory)을 바탕으로 [3]에서의 개념과 유사한 계층구조의 일치성 문제를 다루고 있지만 [3]에서처럼 관리제어기의 설계문제는 다루고 있지 않다. 따라서 본 논문은 [1], [2]에서 정립된 기본적인 관리제어문제의 프레임 상에서 계층적 관리제어기 설계문제를 다루고 있는 [3]의 연구결과들을 바탕으로 이산사건시스템의 계층적 관리제어이론에 대해 알아본다. 또한 본 논문에서는 [3]의 연구결과에서 다루지 않은 계층적 구조의 이산사건시스템에 대한 관리제어기의 비막힘성(nonblockingness)[1] 문제를 새롭게 소개하고, 계층적 일치성 및 비막힘성을 모두 만족시키는 관리제어기의 존재조건을 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다 먼저 2절에서는 본 논문에서 다루고자 하는 이산사건시스템의 계층적 구조에 대해 알아보고, 3절에서는 주어진 계층적 이산사건시스템이 계층적 일치성을 달성하기 위한 조건과 관리제어기 설계과정에 대해 알아본다. 그리고 4절에서는 비막힘성과 계층적 일치성을 위한 관리제어문제에 대해 알아보고, 마지막으로 5절에서 결론을 맺는다.

2. 계층적 구조를 지닌 이산사건시스템

이 절에서 소개하는 이산사건시스템은 그림 1에서처럼 하위레벨의 이산사건시스템  $G_h$ 와 상위레벨의 이산사건시스템  $G_u$ 로 구성된 계층적 구조를 가지며, 각 레벨에서는 해당 이산사건시스템을 제어하는 관리제어

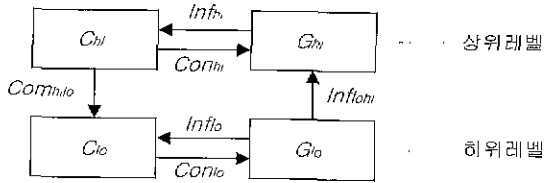


그림 1. 시스템의 계층적 구조.

기  $C_m$ 와  $C_b$ 가 존재한다. 실제 제어대상 시스템은 하위레벨의 이산사건시스템  $G_b$ 로서 주어진 정보사상 (information mapping)인  $Info_{mb}$ 를 통해 상위레벨의 이산사건시스템  $G_m$ 의 동작을 결정한다. 시스템의 사양은 상위레벨의 이산사건시스템 동작 중 원하는 특성을 만족하는 부분들로 구성된다. 주어진 사양을 바탕으로 먼저 상위레벨의 관리제어기  $C_m$ 의 설계가 이루어진다. 설계된 상위레벨 관리제어기를 바탕으로 하위레벨의 관리제어기  $C_b$ 가 설계되고, 이 관리제어기가 실제 제어대상 이산사건시스템인  $G_b$ 를 제어하게 된다. 상위레벨에서는 상위레벨 관리제어기  $C_m$ 가  $G_m$ 에서 발생하는 사건열들을 관측하며 설계가 아닌 가상의 제어를 행한다. 이것은 제어대상이 되는 시스템이 하위레벨 이산사건시스템  $G_b$ 이기 때문에 상위레벨에서의 제어가 비실제적임을 의미하는 것이다. 최종적인 제어목적은 하위레벨 관리제어기  $C_b$ 에 의해 제어되는 이산사건시스템  $G_b$ 의 동작 특성이 정보사상  $Info_{mb}$ 를 통해 상위레벨에 전해졌을 때 처음에 상위레벨에서 주어진 사양과 일치하도록 하는 것이다.

실제 제어대상이 되는 시스템은 앞서 언급했듯이 하위레벨의 이산사건시스템으로서 다음과 같이  $G_b$ 로서 정의된다:  $G_b = (\Sigma, Q, \delta, q_0, Q_m)$ . 여기서  $\Sigma$ 는 하위레벨에서 발생가능한 사건들의 집합을 나타내며,  $Q$ 는 상태들의 집합,  $\delta$ 는 상태전이 함수로서 다음과 같이 정의된다:  $\delta: \Sigma \times Q \rightarrow Q$ . 그리고  $q_0$ 는 시스템의 초기 상태이며,  $Q_m$ 은 표기상태(marked state)들의 집합을 나타낸다. 한편, 사건집합  $\Sigma$ 는 다음과 같이 제어가능한 사건들의 집합  $\Sigma_c$ 와 제어불가능한 사건들의 집합  $\Sigma_{nc}$ 로 분할(partition)된다:  $\Sigma = \Sigma_c \cup \Sigma_{nc}$ .  $\Sigma^*$ 는  $\Sigma$ 를 구성하는 사건들로 이루어진 모든 가능한 사건열(event sequence 혹은 string)들의 집합이며, 빈 문자열(empty string)  $\varepsilon$ 을 포함한다. 두 사건열  $s_1, s_2 \in \Sigma^*$ 에 대해  $s_1 < s_2$ 는  $s_1$ 이  $s_2$ 의 접두(prefix) 사건열임을 의미한다. 언어(language)란  $\Sigma^*$ 의 부분집합을 의미하며, 언어  $K$ 의 접두닫힘(prefix closure) 언어  $\bar{K}$ 는 다음과 같이 정의된다:  $\bar{K} = \{s \in \Sigma^* | sv \in K \text{를 만족하는 } v \in \Sigma^* \text{가 존재함}\}$ . 이때  $\bar{K} = K$ 를 만족하는 경우  $K$ 를 닫힘성

언어(closed language)라고 한다. 상태전이 함수는 사건  $\sigma \in \Sigma$ 에 의한 상태전이로부터 사건열  $s \in \Sigma^*$ 에 의한 상태전이로 다음과 같이 확대 정의될 수 있다:  $\delta: \Sigma^* \times Q \rightarrow Q$ . 본 절에서는 먼저  $Q_m = Q$ 의 경우를 가정하여 이산사건시스템의 비막힘성 문제를 고려하지 않고 단지 시스템에서 언어사양(language specification)의 달성만을 고려한다. 이산사건시스템  $G_b$ 의 동작은  $G_b$ 에서 발생가능한 사건열들의 집합으로서 다음과 같은 생성언어(generated language)로서 정의한다:

$$L_b = L(G_b) = \{s \in \Sigma^* | \delta(s, q_0) \text{가 정의됨}\} \subseteq \Sigma^*.$$

집합  $T$ 를 상위레벨 이산사건시스템의 사건집합으로서  $T = T_c \cup T_{nc}$ 로 정의할 때, 하위레벨에서 상위레벨로의 정보사상  $Info_{mb}$ 은 다음과 같이  $\theta$ 로서 정의된다:

$$\theta: L_b \rightarrow T^*.$$

이때 1)  $\theta(\varepsilon) = \varepsilon$  이고,

2)  $s \in \Sigma^*, \sigma \in \Sigma$ 에 대해,  $\theta(s\sigma) = \theta(s)\sigma$ 이거나

어떤  $\tau \in T$ 에 대하여  $\theta(s\sigma) = \theta(s)\tau$  이다.

정보사상은 하위레벨의 이산사건시스템 동작에 대한 정보와 상위레벨의 이산사건시스템 동작에 대한 정보를 관계시킨다. 따라서 상위레벨의 시스템 동작은 하위레벨 시스템 동작에 대한 이력(history)을 포함하게 되며, 계층적 구조에서 상위레벨의 시스템 동작은 하위레벨에서의 시스템 동작과 정보사상에 의해 결정된다.

빈(empty) 사건  $\tau_0$ 을 도입하여 상위레벨 사건들의 집합  $T_0$ 를 다음과 같이 제정의한다:  $T_0 = T \cup \{\tau_0\}$ . 그리고  $T_0$ 와 앞서 정의된 정보사상을 가지고 하위레벨의 이산사건시스템을 다음과 같이 제정의한다.  $G_b = (\Sigma, T_0, Q, \delta, \omega, q_0, Q_m)$ . 여기서  $T_0$ 는 하위레벨 출력사건들의 집합으로 제해석될 수 있으며,  $\omega$ 는 상태 출력사상(state output mapping)으로서 다음과 같이 정의된다:

$$\omega: Q \rightarrow T_0,$$

즉, 1)  $\omega(q_0) = \tau_0$  이고,

2)  $\theta(s\sigma) = \theta(s)$  이면  $\omega(\delta(s\sigma, q_0)) = \tau_0$  이고,

3)  $\theta(s\sigma) = \theta(s)\tau$  이면  $\omega(\delta(s\sigma, q_0)) = \tau$  이다.

다음으로 하위레벨의 시스템에서 발생하는 각 사건열에 대해 하나의 출력사건을 대응하기 위한 사건열 출력사상  $\hat{\omega}: L_b \rightarrow T_0$ 를 다음과 같이 정의한다

1)  $\theta(s\sigma) = \theta(s)$  이면  $\hat{\omega}(s\sigma) = \tau_0$  이고,

2)  $\theta(s\sigma) = \theta(s)\tau$  이면  $\hat{\omega}(s\sigma) = \tau$  이다

하위레벨 시스템의 동작  $L_b$ 와 정보사상  $\theta$ , 사건열 출력사상  $\hat{\omega}$ 를 바탕으로 상위레벨의 시스템 동작이 결정

되는데, 상위레벨의 이산사건시스템  $G_h$ 의 시스템 동작을 나타내는 언어  $L(G_h) := L_h$ 는 다음과 같이 정의된다:  $L(G_h) := \theta(L_b)$ .

이러한 정의들을 바탕으로 하여 하위레벨 시스템 동작의 제어효과와 상위레벨 시스템의 제어효과에 대한 일치성을 다음과 같은 출력제어 일치성의 개념으로 정의할 수 있다.

정의 1 (출력제어 일치성)[3]: 사건열  $s, s' \in L(G_b)$ 와 사건  $\sigma_i \in \Sigma$ ,  $i=1, 2, \dots, k$ ,에 대해  $s = s' \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_k$ 라고 가정하고,  $\hat{\omega}(s') \neq \tau_o$ ,  $\hat{\omega}(s' \sigma_1 \sigma_2 \dots \sigma_i) = \tau_o$  ( $i=1, \dots, k-1$ )  $\hat{\omega}(s) = \tau \neq \tau_o$  이 만족될 때, 다음의 두 조건이 만족되는 경우 하위레벨의 이산사건시스템  $G_b$ 는 출력제어 일치성(output control consistency)을 가진다고 한다:

- 1)  $\tau \in T_c$ 이면 1에서  $k$  사이에 있는 어떤  $i$ 에 대해  $\sigma_i \in \Sigma_c$ 가 성립하고,
- 2)  $\tau \in T_{uc}$ 이면 1에서  $k$  사이에 있는 모든  $i$ 에 대해  $\sigma_i \in \Sigma_{uc}$ 가 성립한다.

출력제어 일치성은 상위레벨에서 제어가능한 출력사건은 하위레벨 상에서 제어가능한 사건의 제어를 통해서 그 발생을 통제할 수 있음을 의미하는 개념이다. 또한 제어불가능한 출력사건인 경우에는 하위레벨 상에서 그 사건의 발생을 통제할 수 없는 경우를 의미하게 된다. 다음의 그림을 살펴보자.

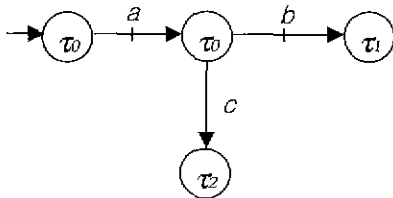


그림 2.  $G_b$ .

그림 2의 하위레벨 시스템  $G_b$ 에서  $\Sigma_c = \{a, b\}$ 이고  $T_{uc} = \{\tau_2\}$ 일 때, 제어가능한 사건  $a$ 로 인해  $G_b$ 는 출력제어 일치성이 만족하지 않게 된다. 그러나  $T_{uc} = \emptyset$ 인 경우는 모든 상위레벨의 제어가능한 사건들을 제어할 수 있는 하위레벨의 제어가능한 사건들이 존재하므로 출력제어 일치성이 만족할 수 있다.

### 3. 계층적 일치성을 위한 관리제어기 설계

본 절에서는 상위레벨에서 언어사양이 주어졌을 때 이를 만족시키기 위한 상위레벨 관리제어기와 하위레벨 관리제어기의 설계과정에 대해 논한다. 특히 하위레벨 관리제어기에 의해 제어된 하위레벨 시스템 동작에

대한 정보사상  $\theta$ 의 결과가 주어진 언어사양과 일치하는 계층적 일치성을 만족시키는 관리제어기 설계문제를 다룬다.

먼저 상위레벨 관리제어기는 다음과 같은 하나의 사상으로 정의될 수 있다:

$$\gamma_h : L_h \times T \mapsto \{0, 1\}.$$

즉, 상위레벨 시스템에서 관측된 하나의 사건열에 대해 각각의 상위레벨 사건의 발생을 허용(enable: 1로 표기)할 지 또는 억제(disable: 0으로 표기)할 지를 결정하는 관리제어기이다.  $\gamma_h$ 는 모든 사건열  $t \in T^*$ 와 제어불가능한 출력사건  $\tau \in T_{uc}$ 에 대해서  $\gamma_h(t, \tau) = 1$ 을 만족하도록 설계된다. 이때, 설계된 상위레벨 관리제어기에서 관측된 사건열에 대한 발생억제 사건들의 집합은 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$\Delta_h : L_h \rightarrow 2^{T_c},$$

$$\Delta_h(t) := \{\tau \in T_c \mid \gamma_h(t, \tau) = 0\}.$$

즉, 상위레벨 사건열  $t$ 의 관측 후 제어가능한 출력사건  $\tau$ 중에서 일부를 취한다.

설계된 상위레벨 관리제어기를 바탕으로 하위레벨 관리제어기는 다음과 같이 설계된다. 먼저 하위레벨의 시스템에서 관측된 사건열과 상위레벨에서 전달된 사건열 발생정보를 바탕으로 발생억제 사건들의 집합을 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$\Delta_b : L_b \times L_h \rightarrow 2^{\Sigma},$$

$$\Delta_b(s, t) = \{\sigma \in \Sigma_r \mid s\sigma' \in L_b \text{이고 } \hat{\omega}(s\sigma') \in \Delta_h(t) \text{이며}$$

$$(\forall s'' \prec s') \hat{\omega}(s\sigma'') = \tau_o \text{을 만족하는 } s' \in \Sigma_{uc}^* \text{이 존재함}\}.$$

이때  $\Delta_b(s, t)$ 의 의미는 다음과 같이 설명될 수 있다. 즉, 하위레벨 사건열  $s$ 의 발생 이후에 사건열  $\sigma'$ 이  $\Delta_h(t)$ 에 속하는 출력사건을 발생시키며 그 이전의 사건열들에 대해서는  $\tau_o$ 만을 출력하는, 제어가능한 하위레벨 사건  $\sigma$ 들로 구성되는 집합이다. 여기서  $s'$ 은 제어불가능한 사건들로 구성된 하위레벨의 사건열이다. 정의된 발생억제 사건들의 집합  $\Delta_b$ 를 이용해 하위레벨 관리제어기는 다음과 같이 설계할 수 있다:

- (1)  $\sigma \in \Delta_b(s, \theta(s))$ 이면  $\gamma_b(s, \sigma) = 0$ ,
- (2) 그 이외의 경우는  $\gamma_b(s, \sigma) = 1$ .

상위레벨의 관리제어기처럼 하위레벨의 관리제어기도 모든  $\sigma \in \Sigma_{uc}$ 에 대해  $\gamma_b(s, \sigma) = 1$ 의 관계가 성립하도록 설계된다.

시스템 사양은 상위레벨의 언어  $E_h(\subseteq L_h)$ 로서 주어지는데, 이때  $E_h$ 는 상위레벨에서 닫혀있고(즉,

$\overline{E_m} = E_m$ , 또한 다음과 같이  $G_m$ 에 대해 제어가능하다고 가정한다:  $\overline{E_m T_{uc}} \cap L_m \subseteq \overline{E_m}$ . 사양  $E_m$ 를 구현하기 위해 먼저 상위레벨 관리제어기를 다음과 같이 설계한다

$$\gamma_m(t, z) = 0 \Leftrightarrow t \in E_m \text{ 그리고 } tz \in L_m - E_m$$

$E_m$ 에 대한 상위레벨 관리제어기  $\gamma_m$ 를 바탕으로 하위레벨의 관리제어기  $\gamma_b$ 가 앞선 정의에 따라서 설계되어졌다고 가정하자. 또한 사양언어  $E_m$ 에 대응하는 하위레벨의 언어  $E_b$ 를 다음과 같이 정의한다:

$$E_b = \theta^{-1}(E_m) \cap L_b.$$

$E_m$ 가 상위레벨에서 제어가능한 언어사양으로 주어졌으므로 자연스럽게  $E_b$ 의 하위레벨 상에서의 제어가능성 문제가 대두된다. 이 문제에 대한 논의를 위해 다음 보조정리 1을 살펴보자.

보조정리 1[3].

- 1)  $L(\gamma_b, G_b)$ 는  $G_b$ 에 대해 제어가능하다. 즉  $L(\gamma_b, G_b)\Sigma_{uc} \cap L_b \subseteq L(\gamma_b, G_b)$ .
- 2)  $L(\gamma_b, G_b) \subseteq E_b$ .
- 3) 모든 제어가능한 언어  $K \subseteq E_b$ 에 대해  $K \subseteq L(\gamma_b, G_b)$ 가  $G_b$ 성립한다.

보조정리 1의 1)은  $\gamma_b$ 가 의 각 상태에서 제어불가능한 사건들을 모두 발생허용하도록 설계되기 때문에 항상 만족하게 된다. 또한 2)는  $\gamma_b$ 가  $E_m$ 에 따라 설계된  $\gamma_m$ 을 바탕으로 설계되므로  $G_b$ 에서 발생가능한 언어들 중 그 정보사상이  $E_m$ 에 속하지 않는 언어들만 발생이 억제됨을 의미한다. 그리고 3)은 1), 2)로부터 쉽게 유도될 수 있다. 그러면 보조정리 1로부터 자연스럽게 다음의 결과를 유추할 수 있다.

명제 1[3]:  $G_b$ 가 출력제어 일치성을 만족시키면 다음의 관계식이 성립한다:

$$L(\gamma_b, G_b) = E_b^{\uparrow}.$$

위에서  $E_b^{\uparrow}$ 는  $E_b$ 의 최고 제어가능 부언어(supremal controllable sublanguage)를 나타낸다[2]. 즉,  $E_b^{\uparrow} := \bigcup \{ K \subseteq E_b \mid \overline{K}\Sigma_{uc} \cap L_b \subseteq \overline{K} \}$ . 위 명제는 상위레벨의 언어사양  $E_m$ 에 따라 설계된 하위레벨의 관리제어기가 달성하는 것은  $E_b$ 의 최고 제어가능 부언어임을 보여준다. 이는 일반적으로 상위레벨의 사양  $E_m$ 가 제어가능하더라도 그것에 대응하는 하위레벨의 언어  $E_b$ 는 제어가능하지 않음을 의미한다. 따라서 앞에서 설계된 상위레벨과 하위레벨의 관리제어기들로부터 시스템을 제어하는 경우 일반적으로 다음과 같은

결과가 성립하게 된다 (단, 시스템이 출력제어 일치성을 가진다는 가정하에서):

$$\theta(L(\gamma_b, G_b)) \subseteq E_m.$$

본 절의 서두에서 언급한 바와 같이 최종적으로 달성되어야 할 제어목적은  $E_m$ 에 따라 설계된 관리제어기에 의해 제어된 하위레벨 시스템이 다음과 같이 정의된 계층적 일치성(hierarchical consistency)을 만족시키는 것이다:

$$\text{계층적 일치성} \Leftrightarrow \theta((\theta^{-1}(E_m))^{\uparrow}) = E_m.$$

따라서, 명제 1에서  $L(\gamma_b, G_b) = E_b^{\uparrow}$ 의 관계가 성립하므로 전체 폐루프(closed-loop) 시스템의 동작이 다음의 관계식을 만족하도록 하는 것이 제어목적이 된다:

$$\theta(L(\gamma_b, g_b)) = E_m.$$

지금부터 시스템 동작이 어떠한 특성을 지닐 때 이러한 계층적 일치성을 달성하는지를 살펴보겠다. 즉,  $\theta(E_b^{\uparrow}) = E_m$ 를 만족시키는 조건을 알아보자. 먼저 [3]에서 소개된 엄격한 출력제어 일치성(strict output control consistency)의 개념을 다음과 같이 재정의한다:

정의 2 (엄격한 출력제어 일치성)[3]:  $G_b$ 가 출력제어 일치성을 만족시키며 또한 다음과 같은 성질을 만족할 때  $G_b$ 는 엄격한 출력제어 일치성을 만족시킨다고 정의한다. 즉, 모든  $s \in L_b$ 에 대하여 다음의 조건을 만족하는  $s_1 \in \Sigma_{uc}^*$ 가 존재하지 않는다: 어떤 사건  $\sigma \in \Sigma_c$ 와 사건열  $s_2 \in \Sigma^+$ 에 대하여  $s\sigma s_1, s\sigma s_2 \in L_b$ 와  $\hat{\omega}(s\sigma s_1) \neq \hat{\omega}(s\sigma s_2)$ 가 성립하고,  $s_3 < \sigma s_1$  또는  $s_3 < \sigma s_2$ 를 만족하는 모든 사건열  $s_3$ 에 대해서는  $\hat{\omega}(s s_3) = \tau_0$ 가 성립된다.

엄격한 출력제어 일치성의 개념은 하위레벨 시스템에서 이루어진 하나의 사건발생 통제가 상위레벨 상에서 두 개 이상의 출력사건들의 발생에 영향을 주지 않는 시스템의 동작특성을 나타내는 개념이다. 위 정의는 엄격한 출력제어 일치성의 정의를 위해 [3]에서 소개된 무동반(partner freedom)개념의 또 다른 표현이다. 정의 2를 바탕으로 시스템에서의 계층적 일치성의 구현은 다음의 명제 2로 표현될 수 있다.

명제 2[3]:  $G_b$ 가 엄격한 출력제어 일치성을 만족시키고  $E_m(\subseteq L(G_m))$ 가 닫힌언어이며, 또한  $L(G_m)$ 에 대해 제어가능한 언어일 때 다음의 관계식이 성립한다:

$$\theta((\theta^{-1}(E_m))^{\uparrow}) = E_m.$$

명제 2의 증명은  $L(\gamma_b, G_b) = E_b^{\uparrow}$ 의 관계와 무동반 성질을 지닌 시스템 동작특성에 의해 쉽게 보여질 수 있

다. 한편 위 결과는 충분조건만을 보이고 있는데, 이는 상위레벨에서 주어지는 임의의 언어사양  $E_{ho}$ 에 대해서 계층적 일치성을 획득하기 위해 부과되는 조건에 해당한다. 따라서 특정사양에 대해서는 시스템이 엄격한 출력제어 일치성을 만족하지 않더라도 계층적 일치성이 만족되는 경우가 존재할 수 있음을 의미한다. 다음의 예를 살펴보자.

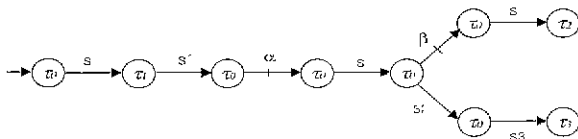


그림 3. 엄격한 출력제어 일치성이 만족되지 않는 시스템  $G_{ho}$ .

[예] 그림 3의 하위레벨 시스템  $G_{ho}$ 에서  $s, s' \in \Sigma^*$ ,  $s_1, s_2, s_3, s' \in \Sigma_{ic}^*$ ,  $\Sigma_c = \{\alpha, \beta\}$ 로 가정하자. 이때,  $\hat{\omega}(ss'as's_2s_3) = \tau_3 \neq \hat{\omega}(ss'as'\beta s_1) = \tau_2$ 이고 제어가능한 사건  $\alpha$  이후에  $\hat{\omega}(ss'as's_2s_3) \neq \tau_3$ 를 만족하는 제어 불가능한 사건열  $s's_2s_3$ 이 존재한다. 따라서 이 시스템은 엄격한 출력제어 일치성이 만족되지 않는다. 그러나 언어사양이  $E_{ho} = (\epsilon, \tau_1, \tau_1\tau_3)$ 로 주어지고, 하위레벨 관리제어기  $\gamma_{ho}$ 가  $\gamma_{ho}(ss', \alpha) = 1, \gamma_{ho}(ss'as', \beta) = 0$ 를 만족하도록 설계되는 경우에 전체 관리제어시스템은  $\theta(L(\gamma_{ho}, G_{ho})) = E_{ho}$ 를 만족하게 되어 계층적 일치성이 이루어짐을 알 수 있다.

지금까지 소개한 이론에 대해 다음 생산시스템의 예를 통해 그 의미를 검증해 보자.

[예] 그림 4는 드릴링 작업을 수행하는 계층적 구조의 작업셀을 보여 주고 있다.

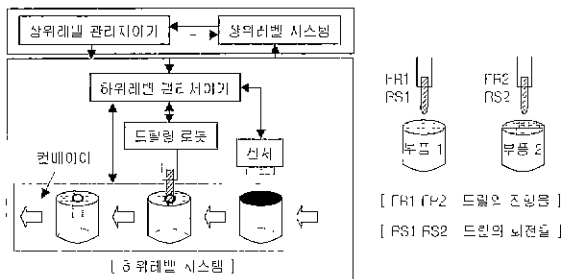


그림 4. 계층적 구조를 가지는 드릴링 작업셀.

이 작업셀에서는 부품 1과 부품 2의 두 가지 종류의 재료를 가공한다. 부품들의 서로 다른 특성 때문에 가공시의 드릴링 동작 조건이 다르게 설정되는데, 본 예에서는 부품 1이 부품 2보다 더 긴고하다고 가정하여 부품 2를 가공할 때의 드릴링의 정상동작 조건인 진행률(feed

rate) FR2와 회전속(rotation speed) RS2가 부품 1을 가공할 때의 정상동작 조건인 FR1과 RS1보다 더 빠르다고 가정하겠다. 이러한 가정 하에서 모든 조건이 정상적인 상태로 작업이 이루어지는 경우에는 고장이 발생하지 않고, 모든 조건이 비정상적인 경우에는 가공 중에 드릴이 가공중인 재료의 구멍 속에서 파손되어 시스템이 정지(breakdown)되거나 혹은 일시적으로 고착되는 고장이 발생할 수 있다고 가정한다. 또한 부품 1의 견고성으로 인해 FR2의 비정상적인 조건에서 동작하는 드릴이 부품 1의 구멍 속에서 파손되는 고장이 발생할 수 있다고 가정한다. 앞서 언급되지 않은 조건들에서는 동작 중에 드릴이 구멍 속에서 고착되거나라도 원상 복구되어 원하는 작업을 수행할 수 있다고 가정한다.

시스템 동작에 대한 위 가정으로부터 하위레벨 시스템의 성분 이산사건모델들을 구하면 그림 5와 같다. 모델에서 정의된 각 사건들의 의미는 표 1에 나타나 있다. 전체사건집합에서 개어가능한 사건들의 집합은  $\Sigma_c = \{FS1, FS2, FS3, FS4, mc, sw, rd\}$ 로 구성된다.

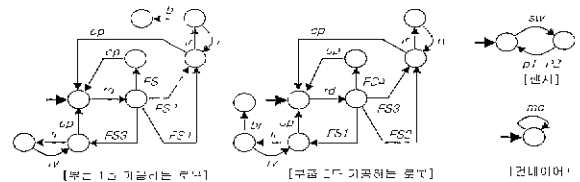


그림 5 시스템의 성분 이산사건모델.

표 1 그림 5에서 각 사건들의 의미.

사건	의미
cp	로봇이 드릴링 작업을 마칩
FS1	드릴링 조건 FR1, RS1로 로봇을 세팅(setting)
FS2	드릴링 조건 FR2, RS2로 로봇을 세팅
FS3	드릴링 조건 FR1, RS2로 로봇을 세팅
FS4	드릴링 조건 FR2, RS2로 로봇을 세팅
rv	재료의 구멍속에서 드릴이 불규칙하게 회전함
br	재료의 구멍속에서 드릴의 불규칙한 회전이 회복됨
mc	컨베이어의 한 단계 이동
sw	센서의 동작 시작을 명령함
p1(p2)	부품1(부품 2)이 센서에 의해 감지됨
rd	다음 작업을 위한 준비 명령

전체 시스템의 이산사건모델을 구성할 때 시스템의 논리적인 동작에 대한 몇가지 제약조건들을 설정한다. 먼저 시스템의 초기상태에서는 가공될 재료가 놓인 컨베이어가 한 단계 움직여서 드릴링 가공이 이루어질 수 있는 위치에 놓이게 하고, 다음으로 센서가 가공될 부품의 종류를 파악한다. 그 다음 드릴링 작업이 이루어지며 작업이 끝나게 되면 다음 작업을 준비하게 된다. 위의 성분 이산사건모델들을 합성하여[11] 전체 하위레벨 시

시스템의 이산사건모델  $G_b$ 을 구하면 그림 6과 같이 된다. 그림 6에서 앞서 설정된 제약조건을 만족하지 않는 사건 경로들은 모델 상에 표시하지 않았다.

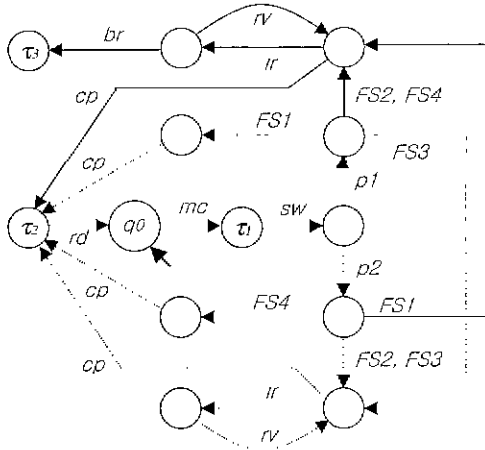


그림 6. 전체 이산사건모델과  $E_b^i$  (점선).

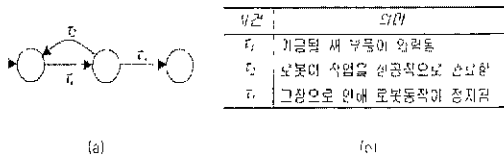


그림 7. (a)  $G_m$  (b) 출력사건들의 의미.

상위레벨의 관리제어기는 고장에 의한 시스템 정지없이 드릴링 작업을 완성하도록 설계하고자 한다. 계층적 구조 상에서 이러한 제어 목적을 달성하기 위해 먼저 정보사상  $\theta$ 를 정의하여야 하는데 구체적인 내용은 그림 6에서 각 상태의 출력 값으로 나타나 있다. 이러한 출력 값들은 상위레벨 사건들의 집합  $T := \{\tau_1, \tau_2, \tau_3\}$ 로 정의되고 전체 상위레벨 시스템의 모델  $G_b$ 는 그림 7(a)와 같다. 제어불가능한 사건들의 집합은  $T_{nc} = \emptyset$ 으로 정의되며, 상위레벨의 각 사건들의 의미는 그림 7(b)에 나타나 있다. 이때 상위레벨 시스템의 사양이 닫힌 언어로서 다음과 같이 주어진다 하자:

$E_b = \{\tau_1 \tau_2\}^* = \{\epsilon, \tau_1 \tau_2, \tau_1 \tau_2 \tau_1 \tau_2, \dots\}$ . 이 사양언어는  $L_b$ 에 대해 제어가능한 언어이다. 또한 간단한 대수적인 확인과정을 통하여  $G_b$ 는 출력제어 만족시킴을 쉽게 확인할 수 있다. 예를 들어 사건열  $s = sw \ p1 \ FS2 \ ir \ br$ 에 대해  $\hat{\omega}(mc \ s) = \tau_3 \in T_c$ 이고  $FS2 \in \Sigma_c$ 가 만족됨을 알 수 있다. 그리고 언어분석을 통해  $G_b$ 가 엄격한 출력제어 일치성을 만족하며 그

림 6에서 점선으로 표현된  $E_b$ 에 대응하는 제어가능 최대 하위레벨 언어  $E_b^i = \hat{\theta}(E_b) = E_b^i$ 은 만족함을 확인할 수 있다. 즉, 예를 들어 하나의 사건열  $s = mc \ sw \ p1 \ FS3 \ ir \ rv \ cp \ rd \in L_b$ 에 대해  $s \in E_b^i$ 와  $\theta(s) = \tau_1 \tau_2 \in E_b$ 가 만족됨을 알 수 있다. 따라서 계층적 일치성을 만족하며 이를 달성하는 관리제어기가 존재하게 되는 것이다.

#### 4. 비막힘성과 계층적 일치성을 위한 관리제어 문제

앞 절에서 소개된 결과들은 하위레벨에서 닫힘성을 지닌 언어사양이 주어진 경우 그 언어에 따라서 상위레벨과 하위레벨의 시스템이 동작하게 하는 계층적 관리제어 문제를 다루었다. 본 절에서는 앞에서 다루지 않은 관리제어기의 비막힘성 문제를 다루고자 한다. 특히, 주어진 상위레벨 사양에 따라 설계된 관리제어기에 의해 제어된 하위레벨 시스템에서 비막힘성이 보장되는 관리제어기 설계문제를 소개한다.

앞 절에서의 가정과 달리 하위레벨 시스템의 표기상태 집합  $Q_m$ 은  $Q$ 와 같지 않고  $Q_m \subset Q$ 로 주어진다고 가정하겠다. 이때 하위레벨에서의 표기언어를  $L_{b,m} = L_m(G_b) := \{s \in \Sigma^* \mid \delta(s, q_0) \in Q_m\}$ 으로 정의할 때 상위레벨에서의 언어사양  $E_b$ 는 다음과 같이 주어지게 된다:

$$E_b \subseteq L_{b,m} := \theta(L_{b,m}).$$

그렇다면 앞 절에서와 같이 하위레벨 시스템이 엄격한 출력제어 일치성을 만족시킨다고 할 때 모든 사양  $E_b$ 에 대해 계층적 일치성  $\theta(E_b^i) = E_b$ 의 원계가  $Q_m \subset Q$ 의 가정 하에서도 만족될 수 있는가의 질문이 제기된다. 다음 예에서 보이지는 이산사건시스템의 경우는 이에 대한 해답을 제공한다.

[예] 먼저  $\Sigma_c = \{a, b, d\}$ 이고  $T_{nc} = \emptyset$ 로 가정했을 때, 그림 8의 이산사건시스템은 엄격한 출력제어 일치성을 만족함을 쉽게 확인할 수 있다. 예를 들어,  $G_b$ 에서 사건  $a$ 가 발생한 이후에 제어가능한 사건  $b, d$ 의 선택적 역제를 통해  $G_b$ 에서  $\tau_2, \tau_3$ 의 발생을 독립적으로 제어할 수 있다. 다음으로 시스템의 상위레벨 사양이 비닫힘성 언어  $E_b = \{\tau_1 \tau_2\}$ 로 주어지는 경우  $\theta^{-1}(E_b) = E_b = \{ab\}$ 이지만  $E_b^i = \emptyset$ 가 되어  $E_b = \theta(E_b^i)$ 가 성립하지 않는다. 따라서 시스템이 엄격한 출력제어 일치성을 만족하지만 비닫힘성 언어사양  $E_b = \{\tau_1 \tau_2\}$ 에 대해서는 계층적 일치성이 만족되지 않음을 알 수 있다.

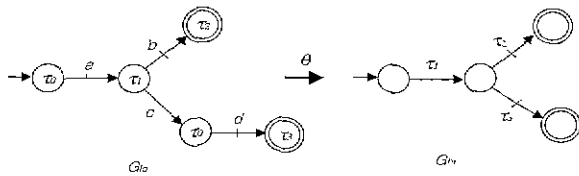


그림 8. 반례를 위한 시스템의 예.

한편 상위레벨 언어사양이  $E_m = \{\tau_1, \tau_2\}$ 인 닫힌언어로 주어지는 경우  $E_b = \{\varepsilon, a, ab, ac\}$ 로 계산된다. 이것은  $E_b^1 = E_b$ 를 만족시키고  $E_m = \theta(E_b^1)$ 이 성립하여 계층적 일치성을 만족하게 된다. 하지만 하위레벨의 시스템  $G_b$ 에서는 막힘성이 존재하게 되어 비막힘성을 보장하는 관리제어기는 존재하지 않음을 알 수 있다.

비막힘성 관리제어기 설계문제를 다루기 위해 먼저 앞 절에서와는 달리 언어사양  $E_m$ 의 제어가능성에 대한 가정을 배제한다. 이것은 앞의 결과에 대한 확장으로서  $E_m$ 가 상위레벨 상에서 제어가능하지 않더라도, 제어결과로서 상위레벨에서의 시스템 동작이  $E_m$ 에 따르도록 하는 것이 가능하기 때문이다. 다음의 예를 살펴보자.

**[예]** 먼저  $\Sigma_{mc} = \{\delta\}$ ,  $T_{mc} = \{\tau_s\}$ 로 가정했을 때, 그림 9에 보이는 시스템에서 사양언어가  $E_m = \{\tau_1, \tau_2\}$ 인 비단힘성 언어로서 주어지는 경우 이 언어는  $L_m$ 에 대해 제어가능하지 않다. 그러나,  $\theta^{-1}(E_m) = \{\alpha\beta\} = E_b$ 이며,  $E_b^1 = \{\alpha\beta\}$ 로서  $\theta(E_b^1) = E_m$ 를 만족하게 된다. 따라서  $\theta(L(\gamma_b, G_b)) = E_m$ 를 만족하는, 즉 계층적 일치성을 만족하는 하위레벨 관리제어기  $\gamma_b$ 가 존재하게 된다.

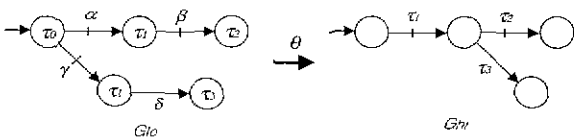


그림 9.  $E_m$ 가 제어가능하지 않은 경우.

계층적 구조에서 비막힘성 문제를 다루기 위해 먼저 하위레벨 관리제어기의 비막힘성을 정의해야 한다. 일반적으로 하위레벨 페루프 시스템에서 발생하는 사건열  $s \in L(\gamma_b, G_b)$ 에 대해  $ss' \in L(\gamma_b, G_b)$ 와  $\theta(ss') \in E_m$ 를 만족하는 사건열  $s'$ 이 존재할 때, 하위레벨 관리제어기  $\gamma_b$ 는 언어사양  $E_m$ 에 대하여 비막힘성을 가진다고 할 수 있다. 이러한 정의를 바탕으로 계층적 일치성을 달성 하면서 비막힘성을 만족시키는 관리제어기의 존재조건을 찾는 연구가 이루어져야 하는데, 주어진 언어사양의

성질에 대한 조건뿐만 아니라 임의의 언어사양에 대해 동일한 비막힘성을 항상 보장하기 위한 조건들을 찾아야 한다. 특히 상위레벨의 언어사양이 제어가능하지 않은 경우에 엄격한 출력제어 일치성의 개념이 비막힘성 및 계층적 일치성의 달성을 위해 어떻게 확장될 수 있는 지에 대한 연구가 필요하다.

### 5. 결론

본 논문에서는 이산사건시스템의 관리제어 (I): 이산사건모델링 및 관리제어이론[11]에서 소개한 개념들을 바탕으로 계층적 구조를 지닌 이산사건시스템에서 계층적 일치성의 개념을 소개하고 이의 달성을 위한 관리제어기의 설계문제에 대해 알아보았다. 특히 계층적 일치성이 제어목적으로 선정되었을 때 상위레벨 상에서 주어진 사양에 따라 설계된 하위레벨의 관리제어기가 하위레벨의 대상시스템을 관리제어함에 의해서 상위레벨의 사양을 만족시키는 계층적 관리제어기가 이루어지는 조건을 살펴보았다. 또한 계층적 일치성이 임의의 제어가능한 언어사양이 주어졌을 때에도 만족되도록 하는 계층적 시스템의 구조와 정보사상의 특성에 대한 조건들을 소개하였다. 그리고 이러한 개념들을 드릴링 작업을 수행하는 간단한 형태의 작업셀의 예를 통하여 이론의 실제 응용가능성을 보여주었다. 마지막으로 제안된 계층적 시스템에서 계층적 일치성과 비막힘성을 동시에 만족하게 하는 관리제어기 설계문제에 대해서도 알아보았다.

본 논문에서 소개된 계층적 관리제어이론은 차후에 보다 현실적인 시스템 동작특성을 고려하여 확장되어야 한다. 예를 들어 제어대상이 되는 이산사건시스템이 모델 불확정성을 가지는 경우나 실시간 제약조건이 존재하는 시간이산사건시스템(timed discrete event systems), 그리고 [12]에서처럼 하위레벨 시스템이 연속변수시스템으로 기술되는 혼합시스템(hybrid systems) 등에 대한 계층적 관리제어이론에 대한 연구가 활발히 이루어질 것으로 기대된다. 또한 실제시스템에 대한 응용기술의 연구가 절실한데, 가령 [13], [14]에서와 같은 일괄처리공정(batch processes)이나 다개체(multi-agent) 시스템에 적용한 연구결과들처럼 대규모 첨단시스템들을 대상으로 계층적 관리제어이론의 체계적 방법론의 유용성을 검증하기 위한 응용연구가 동시에 수반되어야 할 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] H. Zhong and W. M. Wonham, "On the consistency of hierarchical supervision in discrete event systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 35, pp. 1125-1134, 1990.
- [4] K. C. Wong and W. M. Wonham, "Hierarchical control of discrete event systems", *Discrete Event Dynamic Systems: Theory and Applications*, vol. 6, pp. 241-273, 1996.
- [5] Y. Brave and M. Heymann, "Control of discrete event systems modeled as hierarchical state machines", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 38, pp. 1803-1819, 1993.
- [6] P. E. Caines and Y.J. Wei, "The hierarchical lattices of a finite machine", *Systems and Control Letters*, vol. 25, pp. 257-263, 1993.
- [7] W. M. Wonham and P. J. Ramadge, "Modular supervisory control of discrete event systems", *Math. of Control, Signals. and Systems*, vol. 1, pp. 13-30, 1998.
- [8] F. Lin and W. M. Wonham, "Decentralized control and coordination of discrete event systems with partial observation", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 35, pp. 1330-1337, 1990.
- [9] K. Rudie and W. M. Wonham, "Think globally, act locally: decentralized supervisory control", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 37, pp. 1692-1708, 1992.
- [10] K.-H. Cho and J.-T. Lim, "Mixed centralized/decentralized supervisory control of discrete event dynamic systems", *Automatica*, vol. 35, pp. 121-128, 1999.
- [11] 조 광현, 임 종태, "이산사건시스템의 관리제어 (I) : 이산사건모델링 및 관리제어이론", 제어·자동화·시스템공학회지, 제6권, 제3호, 2000.
- [12] E. S. Lemch and P. E. Caines, "On the existence of hybrid models for finite state machines", *Systems and Control Letters*, vol. 36, pp. 253-259, 1999.
- [13] M. Tittus and B. Lemartson, "Hierarchical supervisory control for batch processes", *IEEE Trans. Control Systems Technology*, vol. 7, no. 5, pp. 542-554, 1999.
- [14] P. Hubbard and P. E. Caines. "Initial investigations of hierarchical supervisory control for multi-agent systems", *Proc. IEEE Conf. on Decision and Control*, pp.2218-2223, 1999.

**박성진**

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.

**조광현**

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

**임종태**

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