

## 원전의 제한 계통을 위한 슈퍼바이저 제어기법에 관한 연구

최중인, 배준철  
경원대학교

### 요 약

최신 제어이론의 한 분야인 이산사건 동적시스템 (DEDS : Discrete Event Dynamic System) 제어이론을 원전의 제한 계통에 적용하였다. 이산사건 이론을 원전의 제한 계통 제어 절차에 적용하면 보다 체계적이고 조직적으로 제한 계통을 위한 제어기를 구축할 수 있는 장점이 있다. 본 논문에서는 제한 계통 상태 및 운전원의 조치사항을 이산사건 시스템으로 모델링하여 제약조건에 맞는 슈퍼바이저를 구성하고 이를 바탕으로 제한 계통 제어기를 구축하는 방법을 제시하였다.

### 1. 서 론

원자력 발전소는 노심의 안전성에 대한 특별한 고려 때문에 화력 등의 발전소에 비하여 운전원의 역할이 매우 중요하다. 제한 계통<sup>[1]</sup>은 제어 계통과 보호 계통의 중간 기능을 수행하는 계통으로서 기존 원전에서는 운전원에 의해 수행되고 있다. 따라서 디지털 제한 계통의 개발이란 운전원의 기능을 컴퓨터의 제한 알고리즘으로 대체하는 것이며 제한 알고리즘은 운전원과 같이 지능적 특성을 가지고 있어야 한다. 이를 위하여 퍼지 및 신경망 등의 지능적 제어 기법들이 고려되고 있으나 이들은 설계 검증의 어려움으로 원전에 도입하는데 인허가상 어려움을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이산사건 동적시스템의 제어이론<sup>[2][3][4]</sup>을 바탕으로한 슈퍼바이저 제어 (Supervisory Control) 기법을 원전의 제한 계통 제어에 적용하고자 한다. 이는 사람의 제어동작과 같은 이산적 사건의 해석에 적합하면서도 견고한 이론적 배경을 바탕으로 설계의 투명성을 갖을수 있어 원전에 적용시 인허가성을 높일 수 있다.

### 2. 본 론

논리적 DEDS 모델에서  $\Sigma$ 를 이산사건의 집합이라 하고 물리적으로 가능한 사건의 시퀀스 즉 스트링의 집합을 L로 나타내면, 우리가 고려하는 시스템의 동작을 사건 집합  $\Sigma$ 에 대한 L로 나타내게 되며 이러한 동작 L은 식 (1)과 같은 상태전이모델(state transition model)을 도입함으로써 쉽게 나타내어질 수 있다.

$$G = (Q, \Sigma, f, q_0, Q_m) \quad (1)$$

여기에서  $Q$ 는 상태(state) 집합,  
 $q_0$ 는 초기상태(initial state),  
 $Q_m$ 은 고려대상상태(marker state)의 집합을 나타내며  
 $f : \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 는 상태 천이함수(state transition function)를 나타낸다.

식 (1)에서  $G$ 는 초기상태  $q_0$ 에서 시작하여 상태 천이함수  $f$ 에 따라 사건들의 시퀀스를 발생시키는 동적 시스템(dynamic system)으로 해석될 수 있다. 상태  $q$ 에서 가능한 사건의 집합  $\Sigma(q)$ 는 그 원소가 되는 사건을  $\sigma$ 라 할 때  $f(\sigma, q)$ 가 정의된 집합을 말하며  $q' = f(\sigma, q)$ 는 상태  $q$ 에서 사건  $\sigma$ 가 발생하면 상태천이함수  $f$ 에 의해 상태  $q'$ 로 천이됨을 의미한다. 이를 사건스트링  $s$ 에 대한 상태 천이함수로 확장하면  $q' = f(s, q)$ 는 상태  $q$ 에서 사건들의 시퀀스인 스트링  $s$ 가 발생하면 상태 천이함수  $f$ 에 의해 상태  $q'$ 으로 천이됨을 나타낸다. 따라서 초기상태  $q_0$ 에서  $G$  라는 동적 시스템을 통하여 고려대상상태의 집합  $Q_m$ 에 도달하도록 하는 사건의 스트링의 집합을  $L_m$  이라고 할 때 다음의 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L_m(G) = \{s : s \in L \text{ and } f(s, q_0) \in Q_m\} \quad (2)$$

DEDS를 제어하기 위해서는 어떤 사건들을 원하는 때에 일어나게 하거나(enable) 혹은 일어나지 않도록(disable) 하여야 한다. 이를 위해서는 사건집합  $\Sigma$ 를 제어 가능한 사건의 집합  $\Sigma_c$ 와 제어 불가능한 사건  $\Sigma_u$ 로 나눌 때,  $\Sigma_c$ 에 대하여 제어 입력의 집합을  $U = \{0, 1\}$ 로 정의하고 제어입력  $u \in U$ 는  $u : \sigma \rightarrow \{0, 1\}$ 로 나타내어지는데, 여기에서  $u(\sigma) = 1$ 이면 사건  $\sigma$ 가  $u$ 에 의해 enable됨을,  $u(\sigma) = 0$ 이면 사건  $\sigma$ 가  $u$ 에 의해 disable됨을 나타낸다. 이때 확장된 상태 천이함수  $f_c : U \times \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 를 정의하고 이에따라 제어된 이산사건시스템(Controlled Discrete Event System : CDES),  $G_c$ 를 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_c = (Q, U \times \Sigma, f_c, q_0, Q_m) \quad (3)$$

CDES의 제어는 앞서 일어난 사건의 스트링을 관측하여 주어진  $G_c$ 가 여러 조건들을 만족하도록 제어입력을 스위칭(switching) 시킴으로써 이루어지는데 그러한 제어를 슈퍼바이저 제어기라 한다. 그림 1에서 보여주는 슈퍼바이저 제어기  $S$ 는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S = (R, \Phi) \quad (4)$$

여기에서  $R = (X, \Sigma, \zeta, x_0, X_m)$ 으로 표현되는데,  $X$ 는 슈퍼바이저에 의해 관측되는 상태 집합,  $\zeta : \Sigma \times X \rightarrow X$ 는 상태 천이함수,  $x_0$ 는 초기상태,  $X_m$ 는 고려대상상태를 나타낸다. 상태 반환 사상(state feedback map)라 불리는  $\Phi : X \rightarrow U$ 는 슈퍼바이저 제어기의 상태  $x$ 를 제어 입력  $u$ 로 상사시키는 함수이다. 즉  $G_c$ 에서 발생하는 사건의 시퀀스가 슈퍼바이저 제어기의 입력으로 들어가 관측된 사건으로의 천이를 일으키고 이 상태가  $\Phi$ 에 의해 제어입력  $u$ 를 결정하게 된다. 따라서  $G_c$ 와 슈퍼바이저 제어기  $S$ 가 결합된 시스템  $S \parallel G_c$ 는

$$S \parallel G_c = (X \times Q, \Sigma, \zeta \times f_c, (x_0, q_0), X_m \times Q_m) \quad (5)$$

으로 표현되며  $L(S \parallel G_c)$ 가 결합된 시스템의 동작 상태를 표시하게 된다. 슈퍼바이저 제어기의 설계는 이 시스템의 동작  $L(S \parallel G_c) = K$ 가 되도록 슈퍼바이저 제어기  $S$ 를 설계하는 것이다. 여기에서  $K$ 는 주어진 시스템이 원하는 상태로만 가도록 하는 동작으로 목적에 따라

안정동작, 강인 안정동작, 최적 동작 등의 수퍼바이저 제어기를 설계할 수 있다.

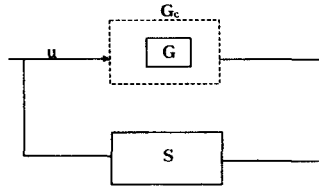


그림 1 수퍼바이저 제어 시스템

이상의 정립된 수퍼바이저 제어이론을 디지털 제한 계통의 전향 제한 알고리즘에 적용하였다. 전향 제한 알고리즘은 차세대 원전의 출력 자동제어 기법인 Mode K<sup>[5]</sup>를 위한 것으로 그 내용은 다음과 같다. Mode K의 제어기법은 그림 2에서 보여주는대로 출력 레벨을 위한 제어변수  $T_{avg}$ 와 출력분포를 위한  $\Delta I$ 에 따른 제어불감대 운전 영역에서 시작하여 원전 노심이 이 영역을 벗어날 경우 회복 시키는 제어 알고리즘이다. 이는 두 종류의 제어봉 그룹에 의해 수행되는데 먼저 출력레벨은 RROD로, 그리고 출력분포는 HROD로 각각 독립적인 이중 구조로 제어하도록 설계되어 있다. 이를 그림 3에서 도식적으로 각 영역에서 제어봉의 움직임을 보여주고 있다. 이 경우 제한계통의 작동은 자동제어가 그 기능을 수행하지 못하는 제한적 경우에 수행된다. 제한적 경우는 RROD 혹은 HROD가 각각 삽입제한점 (IL: Insertion Limit) 혹은 인출제한점 (WL: Withdrawal Limit)에 도달하여 그 움직임이 한 방향으로 제한되는 경우를 말한다. 이때 제어 알고리즘에서 작동되지 못하는 방향으로의 움직임이 요구되는 경우 자동제어 기능은 실패하게된다. 따라서 운전원이 이를 회복할 수 있는 제한조치를 작동시키는데 이를 자동으로 수행하는 것이 디지털 제한 계통의 전향 제한 알고리즘이다.

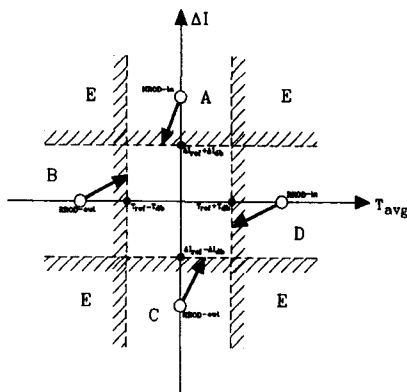


그림 2 Mode K 운전기법

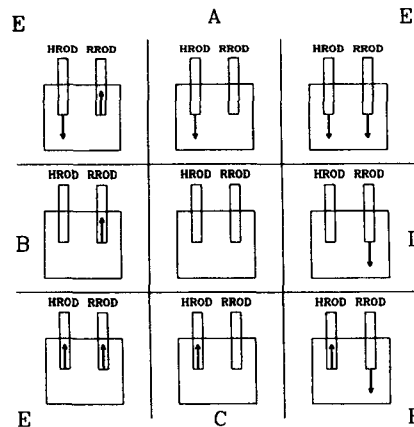


그림 3 Mode K에서의 RROD, HROD 동작

앞서 설명한 전향 제한 알고리즘은 운전원의 조치를 모의하므로 이산사건동특성으로 해석하는 것이 적절하다는 생각에서 이를 근간으로 하는 수퍼바이저 제어 기법의 적용을 시도하였다. 그러나 전향 제한 알고리즘의 전부를 모의하기는 매우 방대하여 본 연구에서는 먼저 부분적 기능에 적용하여 보았다. 즉 RROD는 자동으로 수행되고 제한 조치는 HROD에 의해서만 수행된다는 가정하에서 이를 해석하였다. 먼저 DEDS를 정의하기 위한 부 시스템으로 HROD와 출력 분포를 나타내는 ASI를 고려하였다. 즉 전향 제한 알고리즘을 위한 DEDS를  $G_{MK}$  라 하면 식 (6)과 같이 나타낼수 있다.

$$G_{MK} = G_{HROD} \parallel G_{ASI} = (Q_{MK}, \Sigma_{MK}, f_{MK}, q_0, Q_{mMK}) \quad (6)$$

여기서 HROD의 작동상태를 정상상태와 2개의 제한상태(IL 과 WL)의 3가지 상태로, 그리고 ASI를 정상상태와 하부치중(Down) 및 상부치중(Up)의 3가지 상태로 각각 정의하고 이를 종합한 전체의 시스템은 다음의 표 1과 같이 9가지의 상태로 정의하였다.

표 1 시스템의 상태

ASI/HROD	Normal	IL	WL
Normal	$q_0$	$q_1$	$q_2$
Down	$q_3$	$q_4$	$q_5$
Up	$q_6$	$q_7$	$q_8$

상태 집합  $Q_{MK} : q_0, q_1, \dots, q_8$

이 시스템에 대하여 사건의 집합  $\Sigma_{MK}$  를 고려하면 먼저 HROD가 삼입되는 사건 (HROD IN)  $\sigma_1$  과 인출되는 사건 (HROD OUT)  $\sigma_2$  그리고 HROD가 삼입제한점(IL)에 도달하는 사건  $\sigma_3$  와 인출제한점(WL)에 도달하는 사건  $\sigma_4$  로 정의되며 또한 제한 조치를 수행하는 보론 계통의 boration  $\sigma_5$  와 dilution  $\sigma_6$  의 6가지 사건으로 다음과 같이 정의하였다.

사건 집합  $\Sigma_{MK} : \sigma_1$  (HROD IN),  $\sigma_2$  (HROD OUT)  
 $\sigma_3$  (HROD가 IL에 도달),  $\sigma_4$  (HROD가 WL에 도달),  
 $\sigma_5$  (boron boration),  $\sigma_6$  (boron dilution)

다음으로 제어입력이 고려되는 CDES는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{cMK} = (Q_{MK}, U \times \Sigma_{MK}, f_{cMK}, q_0, Q_{mMK}) \quad (7)$$

여기서 제어가능 사건집합  $\Sigma_{cMK} : \sigma_1, \sigma_2, \sigma_5, \sigma_6$  이고 제어불가능 사건집합  $\Sigma_{uMK} : \sigma_3, \sigma_4$  이다. 다음은 모든 상태가 관측 가능하다면 시스템  $G_{MK}$  의 상태 집합  $Q_{MK}$  가 수퍼바

이제 제어기에서 관측되는 상태의 집합  $X_{MK}$  와 동일하다고 가정하면 수퍼바이저 제어기는 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있을 것이며 또한 이를 포함하는  $G_{cMK}$ 와 의 전체시스템은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있을 것이다.

$$S_{MK} = (G_{MK}, \Phi_{MK}) \quad (8)$$

$$S_{MK} \parallel G_{cMK} = (X_{MK}, \Sigma_{MK}, \zeta_{MK}, x_0, X_m^{MK}) \quad (9)$$

여기서 상태 천이함수  $\zeta_{MK} : \Sigma_{MK} \times X_{MK} \rightarrow X_{MK}$  는 다음의 표 2와 같고, 이를 보다 도식적 해석방법인 오토마타로 나타내면 그림 4와 같다.

표 2 시스템의 상태천이

	(q0)	(q1)	(q2)	(q3)	q4	q5	(q6)	q7	q8
q0		$\sigma_3$	$\sigma_4$	$\sigma_1$			$\sigma_2$		
q1								$\sigma_2$	
q2						$\sigma_1$			
q3	$\sigma_2$				$\sigma_3$	$\sigma_4$			
q4		$\sigma_2$							
q5				$\sigma_5$					
q6	$\sigma_1$							$\sigma_3$	$\sigma_4$
q7							$\sigma_6$		
q8			$\sigma_1$						

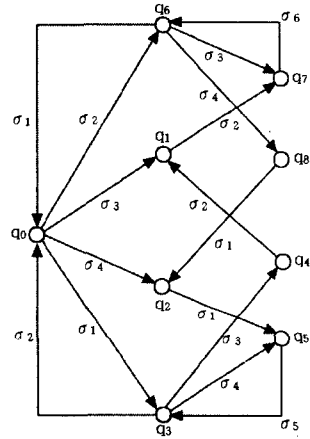


그림 4 상태천이 동작

여기서 우리가 원하는 상태는 상태 0, 1, 2, 3 그리고 6의 5개로서 제어 가능한 사건들에 대한 수퍼바이저 제어를 통하여 항상 원하는 상태로 가도록 상태 전환 상사  $\Phi_{MK} : X_{MK} \rightarrow U_{MK}$  를 다음의 표 3과 같이 설계하였다.

표 3 상태 전환 상사

	0	1	2	3	4	5	6	7	8
u1	-	-	-	0	0	0	1	0	1
u2	-	-	-	1	1	0	0	0	0
u5	-	-	-	0	0	1	0	0	0
u6	-	-	-	0	0	0	0	1	0

1 = enable, 0 = disable, - = immaterial

이는 제어 가능한 사건  $\sigma_1$  및  $\sigma_2$  그리고  $\sigma_5$  및  $\sigma_6$  에 대한 각각의 입력 신호  $u_1, u_2, u_5$  , 그리고  $u_6$  에 대한 enable과 disable의 제어를 수행하여 어떠한 경우에도 시스템의 상태가 우리가 원하는 상태로 제어됨을 해석적으로 보여주고 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 슈퍼바이저 제어이론의 개념을 정립하고 이를 바탕으로 원전의 제한 계통 제어에 적용하였다. 계통에 적용된 Mode K 기법은 이산사건 동적시스템으로 모델링 하기에는 매우 복잡하므로 부 시스템으로 HROD와 ASI를 고려하여 전향 제한 알고리즘을 위한 DEDS를 모델링 하였다. 사건집합은 제어가능한 사건집합과 제어불가능한 사건집합으로 분리하고 제어가능한 사건에 대한 입력 신호를 제어하여 어떠한 경우에도 시스템의 상태가 우리가 원하는 상태로 제어되는 슈퍼바이저 제어기를 설계하였다.

### 참 고 문 헌

- [1] J. I. Choi, "A Conceptual Model of Power Maneuverability for Digital Supervisory Limitation Sys," IEEE Trans Nucl. Scie, Vol. 42, No. 6, 1995. 12
- [2] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "Supervisory control of a class of discrete event processes," SIAM J. Contr. Opt. vol. 25, no. 1, pp. 206-230, Jan. 1987.
- [3] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "The control of discrete event system," Proc. IEEE, vol. 77, no. 1, pp. 81-98, Jan. 1989.
- [4] P. J. Ramadge and W. M. Wonham, "On the supremal controllable sublanguage of a given language," SIAM J. Contr. Opt, vol. 25, no. 3, pp. 637-659, May. 1987.
- [5] J. I. Choi, Y. j. Hah, U. C. Lee, "Automatic Reactor Power Control for A Pressurized Water Reactor," Nuclear Technology, Vol. 102, pp. 277-286, 1993.