

원자력 발전소를 위한 수퍼바이저 제어기법에 관한 연구

論 文
48A-9-8

A Study on the Supervisory Control for Nuclear Power Plants

裴俊喆* · 崔重仁**
(Jun-Cheol Bae · Jung-In Choi)

Abstract - A major objective of the study is to propose a supervisory control algorithm based on the discrete event dynamic system (DEDS) model and apply it to the automation of nuclear operations. The study is motivated by the suitability of the DEDS model for simulation of man-made control action and the potential of the DEDS based supervisory control algorithm for enhanced licensibility, when implemented in nuclear plants, through design transparency due to strong analytic backgrounds. The DEDS model can analytically show the robust stability of the proposed supervisory controller providing design transparency for enhanced licensibility when implemented in nuclear operations.

Key Words : DEDS, 상태 천이 모델, CDES, Supervisory Control, Mode K

1. 서 론

원자력 발전소는 노심의 안전성에 대한 특별한 고려 때문에 화력 등의 발전소에 비하여 운전원의 역할이 매우 중요하다. 제한계통은 제어계통과 보호계통의 중간기능을 수행하는 계통으로서 기존 원전에서는 운전원에 의해 수행되고 있다. 따라서 디지털 제한계통의 개발이란 운전원의 기능을 컴퓨터의 제한 알고리즘으로 대체하는 것이며 제한 알고리즘은 운전원과 같이 지능적 특성을 가지고 있어야 한다. 이를 위하여 퍼지 및 신경망 등의 지능적 제어기법들이 고려되고 있으나 이들은 설계 검증의 어려움으로 원전에 도입하는데 인허가상 어려움을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 이산사건 동적 시스템의 제어이론을 바탕으로 한 수퍼바이저 제어(Supervisory Control)기법을 원전의 제한 계통 제어[1]에 적용하고자 한다. 이는 사람의 제어동작과 같은 이산적 사건의 해석에 적합하면서도 견고한 이론적 배경을 바탕으로 설계의 투명성을 갖을 수 있어 원전에 적용시 인허가성을 높일 수 있다.

2. 수퍼바이저 제어이론 및 설계

논리적 DEDS 모델에서 Σ 를 이산사건의 집합이라 하고 물리적으로 가능한 사건의 시퀀스 즉 스트링의 집합을 L 로 나타내면, 우리가 고려하는 시스템의 동작을 사건 집합 Σ 에 대한 L 로 나타내게 되며 이러한 동작 L 은 식 (1)과 같은 상

태천이모델(state transition model)[2]을 도입함으로써 쉽게 나타내어질 수 있다.

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

여기에서 Q 는 상태(state) 집합을 나타내며 q_0 는 초기상태(initial state), Q_m 은 고려대상상태(marker state)의 집합, $f : \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 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 σ 라 할 때 $f(\sigma, q)$ 가 정의된 집합을 말하며 $q' = f(\sigma, q)$ 는 상태 q 에서 사건 σ 가 발생하면 상태천이함수 f 에 의해 상태 q' 로 천이됨을 의미한다. 이를 사건스트링 s 에 대한 상태천이 함수로 확장하면 $q' = f(s, q)$ 는 상태 q 에서 사건들의 시퀀스인 스트링 s 가 발생하였을 때 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 위해서 어떤 사건들을 원하는 때에 일어나게 하거나(enable) 혹은 일어나지 않도록(disable) 하여야 한다. 이를 위해서는 사건집합 Σ 를 제어가능한 사건의 집합

* 正 會 員 : 暎園大 大學院 電氣電子工學科 博士課程

** 正 會 員 : 暎園大 工大 電氣電子工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 1998年 10月 30日

最終完了 : 1999年 8月 10日

Σ_c 와 제어불가능한 사건 Σ_u 로 나눌 때, Σ_c 에 대하여 제어 입력의 집합을 $U = \{0, 1\}$ 로 정의하고 제어입력 $u \in U$ 는 $u : u(\sigma) \rightarrow \{0, 1\}$ 로 나타내어지는데, 여기에서 $u(\sigma) = 1$ 이면 사건 σ 가 u 에 의해 enable됨을, $u(\sigma) = 0$ 이면 사건 σ 가 u 에 의해 disable됨을 나타낸다. 이때 확장된 상태전이 함수 $f_c : U \times \Sigma \times Q \rightarrow Q$ 를 정의하고 이에따라 제어된 이산 사건시스템(Controlled Discrete Event System : CDES)[3], G_c 를 식 (3)과 같이 나타낼수 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 제어기를 슈퍼바이저 제어기라 한다. 그림 1에서 보여주는 슈퍼바이저 제어기 S는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

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

여기에서 $R = (X, \Sigma, \zeta, x_0, X_m)$ 으로 표현되는데, X는 슈퍼바이저에 의해 관측되는 상태집합, $\zeta : \Sigma \times X \rightarrow X$ 는 상태 전이함수, x_0 는 초기상태, X_m 는 고려대상상태를 나타낸다. 상태 케환 사상(state feedback map)라 불리는 $\Phi : X \rightarrow U$ 는 슈퍼바이저 제어기의 상태 x 를 제어 입력 u 로 사상시키는 함수이다. 즉 G_c 에서 발생하는 사건의 시퀀스가 슈퍼바이저 제어기의 입력으로 들어가 관측된 사건으로의 전이를 일으키고 이 상태가 Φ 에 의해 제어입력 u 를 결정하게 된다. 따라서 G_c 와 슈퍼바이저 제어기 S가 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 S를 설계하는 것이다. 여기에서 K는 주어진 시스템이 원하는 상태로만 가도록 하는 동작으로 목적에 따라 안정동작, 강인 안정동작, 최적 동작 등의 슈퍼바이저 제어기를 설계할 수 있다.

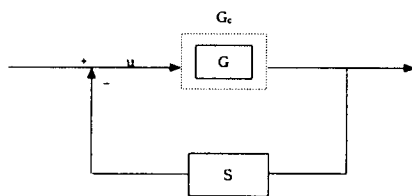


그림 1 슈퍼바이저 제어시스템
Fig. 1 Supervisory control system.

이상의 정립된 슈퍼바이저 제어이론을 디지털 제한 계통의 전향 제한 알고리즘에 적용하였다. 전향 제한 알고리즘은 차세대 원전의 출력 자동제어 기법인 Mode K[4][5]를 위한 것으로 그 내용은 다음과 같다. Mode K의 제어기법은 그림 2

에서 보여 주는 대로 출력 레벨을 위한 제어변수 T_{avg} (냉각수의 평균온도로서 출력레벨)와 출력분포를 위한 ΔI (상부출력과 하부출력의 차이로서 출력분포를 나타내는 지수)에 따른 제어 불감대 운전 영역에서 시작하여 원전 노심이 이 영역을 벗어날 경우 회복시키는 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 : Withdraw Limit)에 도달하여 그 움직임이 한 방향으로 제한되는 경우를 말한다. 이 때 제어 알고리즘에서 작동되지 못하는 방향으로의 움직임이 요구되는 경우 자동제어 기능은 실패하게 된다. 따라서 운전원이 이를 회복할 수 있는 제한조치를 작동시키는데 이를 자동으로 수행하는 것이 디지털 제한 계통의 전향 제한 알고리즘이다.

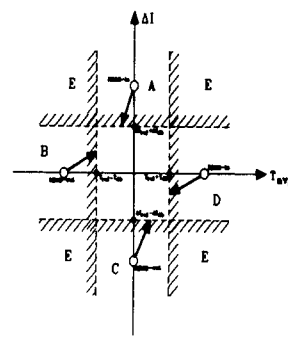


그림 2. Mode K 운전기법
Fig 2. Mode K operating method.

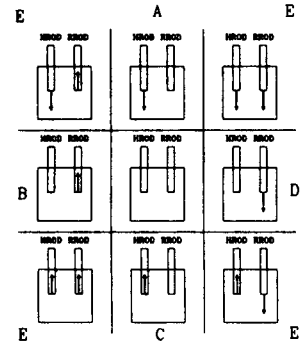


그림 3 Mode K에서의 RROD, HROD 동작
Fig. 3 RROD, HROD operation in mode K.

앞서 설명한 전향 제한 알고리즘은 운전원의 조치를 모의하므로 이산사건 동특성으로 해석하는 것이 적절하다는 생각에서 이를 근간으로 하는 슈퍼바이저 제어 기법의 적용을 시도하였다. 먼저 DEDES를 정의하기 위한 부 시스템으로 노심과 제어봉을 고려하였다. 즉, 전향 제한 알고리즘을 위한 DEDES를 G_{MK} 라 하면 다음의 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$G_{MK} = G_{노심} \parallel G_{제어봉} = (Q_{MK}, \Sigma_{MK}, f_{MK}, q_0, Q_{MK}) \quad (6)$$

여기서 노심은 반응도와 분포로 구분하고 반응도의 동작 상태를 정상상태(Normal) 및 Negative와 Positive의 3가지 상태로, 분포는 정상상태와 상부치중(Up) 및 하부치중(Down) 상태의 3가지 상태로 정의한다. 또한 부 시스템인 제어봉은 RROD와 HROD로 구분하고 각각의 상태를 정상상태와 2개의 제한상태(IL과 WL)의 3가지 상태로 정의한다. 이를 종합한 전체의 시스템은 다음의 표 3과 같이 81가지의 상태로 정의하였다.

표 1 노심(subsystem 1)의 상태

Table 1 State of reactor core(Subsystem 1).

반응도(RROD)	Negative	Normal	Positive
분포(HROD)			
Up	a ₁	a ₂	a ₃
Normal	a ₄	a ₅	a ₆
Down	a ₇	a ₈	a ₉

표 2 제어봉(subsystem 2)의 상태

Table 2 State of control rod(Subsystem 2).

RROD	IL	Normal	WL
HROD			
IL	b ₁	b ₂	b ₃
Normal	b ₄	b ₅	b ₆
WL	b ₇	b ₈	b ₉

표 3 전체시스템(총 81개)의 상태

Table 3 State composed of two subsystems.

노심	a ₁ ...	... a ₃ ...	... a ₆ ...	... a ₉
제어봉				
b ₁	q ₁₁ ...	... q ₁₃ ...	... q ₁₆ ...	... q ₁₉
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b ₃	q ₃₁ ...	... q ₃₃ ...	... q ₃₆ ...	... q ₃₉
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b ₆	q ₆₁ ...	... q ₆₃ ...	... q ₆₆ ...	... q ₆₉
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
b ₉	q ₉₁ ...	... q ₉₃ ...	... q ₉₆ ...	... q ₉₉

상태집합 Q_{MK} : q₁₁, q₁₂, ..., q₁₉,
q₂₁, q₂₂, ..., q₂₉, ..., q₉₁, q₉₂, ..., q₉₉

이 시스템에 대하여 사건의 집합 Σ_{MK}를 고려하면 먼저 HROD가 삽입되는 사건(HROD IN) σ₁과 인출되는 사건(HROD OUT) σ₂, 그리고 RROD가 삽입되는 사건(RROD IN) σ₃과 인출되는 사건(RROD OUT) σ₄, 그리고 HROD가 삽입 제한점에 도달하는 사건 σ₅(HROD IL)와 인출 제한점에 도달하는 사건 σ₆(HROD WL)로 정의하며, RROD가 삽입 제한점에 도달하는 사건 σ₇(RROD IL)과 인출 제한점에 도달하는 사건 σ₈(RROD WL)로 정의한다. 또한 제한 조치를 수행하는 보론 계통은 RROD의 삽입제한시 boron boration σ₉와 RROD의 인출제한시 boron dilution σ₁₀, 그리고 HROD의 삽입제한시 boron dilution σ₁₁, HROD의 인출 제한시 boron boration σ₁₂의 12가지 사건으로 다음과 같이 정의한다.

사건집합 Σ_{MK} :

- σ₁(HROD IN), σ₂(HROD OUT), σ₃(RROD IN), σ₄(RROD OUT),
- σ₅(HROD IL), σ₆(HROD WL), σ₇(RROD IL), σ₈(RROD WL),
- σ₉(RROD IL boron boration), σ₁₀(RROD WL boron dilution),
- σ₁₁(HROD IL boron dilution), σ₁₂(HROD WL boron boration)

다음으로 제어입력이 고려되는 CDES는 식 (7)과 같이 나타낸다.

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

여기서 제어 가능한 사건집합은 Σ_{cMK} : {σ₁, σ₂, σ₃, σ₄, σ₉, σ₁₀, σ₁₁, σ₁₂}이고 제어 불가능한 사건집합은 Σ_{uMK} : {σ₅, σ₆, σ₇, σ₈}이다. 다음은 모든 상태가 관측 가능하고 시스템 G_{MK}의 상태집합 Q_{MK}가 수퍼바이저 제어기에서 관측되는 상태집합 X_{MK}와 동일하다고 가정하면 수퍼바이저 제어기는 다음의 식 (8)과 같이 나타낼 수 있고 또한 이를 포함하는 G_{cMK}와의 전체시스템은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

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

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

여기서 상태 천이함수 ζ_{MK} : Σ_{MK} × X_{MK} → X_{MK}에 의한 상태천이는 다음의 표 4와 같다.

표 4-1 상태천이(1/12)

Table 4-1 State transition(1/12).

to from	q ₁₁	q ₁₂	q ₁₃	q ₁₄	q ₁₅	q ₁₆	q ₁₇	q ₁₈	q ₁₉	q ₂₁	q ₂₂	q ₂₃	q ₂₄	q ₂₅	q ₂₆	q ₂₇	q ₂₈	q ₂₉	q ₃₁	q ₃₂	q ₃₃	
q ₁₁	σ ₅			σ ₁₁							σ ₄											
q ₁₂	σ ₉	σ ₅ , σ ₇			σ ₁₁							σ ₄										
q ₁₃	σ ₉	σ ₇			σ ₁₁																	
q ₁₄			σ ₅			σ ₁₁									σ ₄							
q ₁₅			σ ₉	σ ₅ , σ ₇			σ ₁₁									σ ₄						
q ₁₆				σ ₉	σ ₅ , σ ₇			σ ₁₁														
q ₁₇																						σ ₄
q ₁₈							σ ₉	σ ₇														σ ₄
q ₁₉								σ ₉	σ ₇													
q ₂₁										σ ₅			σ ₁₁									σ ₄
q ₂₂	σ ₃										σ ₅			σ ₁₁								σ ₄
q ₂₃		σ ₃										σ ₅			σ ₁₁							
q ₂₄													σ ₃			σ ₁₁						
q ₂₅			σ ₃											σ ₅			σ ₁₁					
q ₂₆				σ ₃											σ ₅			σ ₁₁				
q ₂₇																						
q ₂₈							σ ₃															
q ₂₉								σ ₃														
q ₃₁																				σ ₅ , σ ₈	σ ₁₀	
q ₃₂									σ ₃												σ ₅ , σ ₈	σ ₁₀
q ₃₃										σ ₃												σ ₅

표 4-8 상태전이(8/12)

Table 4-8 State transition(8/12).

No from	Q57	Q58	Q59	Q61	Q62	Q63	Q64	Q65	Q66	Q67	Q68	Q69	Q71	Q72	Q73	Q74	Q75	Q76	Q77	Q78	Q79
Q57											σ_4										
Q58												σ_4									
Q59																					
Q61				σ_8	σ_{10}																
Q62				σ_8	σ_{10}																
Q63																					
Q64						σ_8	σ_{10}														
Q65						σ_8	σ_{10}														
Q66																					
Q67										σ_8	σ_{10}										
Q68	σ_3									σ_8	σ_{10}										
Q69		σ_3																			
Q71																					
Q72										σ_9	σ_7										
Q73										σ_9	σ_7										
Q74										σ_{12}		σ_6									
Q75										σ_{12}		σ_9	σ_6								
Q76										σ_{12}		σ_9	σ_7	σ_6							
Q77										σ_{12}		σ_9	σ_7	σ_6							
Q78											σ_{12}	σ_9	σ_7	σ_6							
Q79												σ_{12}	σ_9	σ_7	σ_6						

표 4-11 상태전이(11/12)

Table 4-11 State transition(11/12).

No from	Q57	Q58	Q59	Q61	Q62	Q63	Q64	Q65	Q66	Q67	Q68	Q69	Q71	Q72	Q73	Q74	Q75	Q76	Q77	Q78	Q79
Q61																					
Q62														σ_3							
Q63														σ_3							
Q64	σ_1																				
Q65		σ_1															σ_3				
Q66			σ_1														σ_3				
Q67																					
Q68																				σ_3	
Q69																				σ_3	
Q71																					
Q72																					
Q73																					
Q74																					
Q75													σ_1								
Q76													σ_1								
Q77													σ_1								
Q78														σ_1							
Q79															σ_1						

표 4-9 상태전이(9/12)

Table 4-9 State transition(9/12).

No from	Q81	Q82	Q83	Q84	Q85	Q86	Q87	Q88	Q89	Q91	Q92	Q93	Q94	Q96	Q97	Q98	Q99
Q57				σ_2													
Q58				σ_2													
Q59					σ_2												
Q61						σ_2											
Q62							σ_2										
Q63								σ_2									
Q64									σ_2								
Q65										σ_2							
Q66											σ_2						
Q67												σ_2					
Q68													σ_2				
Q69														σ_2			
Q71		σ_4															
Q72			σ_4														
Q73				σ_4													
Q74					σ_4												
Q75						σ_4											
Q76							σ_4										
Q77								σ_4									
Q78									σ_4								
Q79										σ_4							

표 4-12 상태전이(12/12)

Table 4-12 State transition(12/12).

No from	Q81	Q82	Q83	Q84	Q85	Q86	Q87	Q88	Q89	Q91	Q92	Q93	Q94	Q96	Q97	Q98	Q99
Q81											σ_4						
Q82												σ_4					
Q83													σ_4				
Q84	σ_{12}			σ_6										σ_4			
Q85		σ_{12}			σ_6										σ_4		
Q86			σ_{12}			σ_6										σ_4	
Q87				σ_{12}			σ_6										σ_4
Q88					σ_{12}			σ_6									σ_4
Q89						σ_{12}			σ_6								
Q91								σ_8		σ_{10}							
Q92	σ_3										σ_8	σ_{10}					
Q93		σ_3															
Q94									σ_{12}				σ_6 , σ_8	σ_{10}			
Q95					σ_3					σ_{12}			σ_6 , σ_8	σ_{10}			
Q96						σ_3					σ_{12}			σ_6			
Q97												σ_{12}			σ_6 , σ_8	σ_{10}	
Q98							σ_3							σ_{12}		σ_6 , σ_8	σ_{10}
Q99								σ_3							σ_{12}		σ_6 , σ_8

표 4-10 상태전이(10/12)

Table 4-10 State transition(10/12).

No from	Q34	Q35	Q36	Q37	Q38	Q39	Q41	Q42	Q43	Q44	Q45	Q46	Q47	Q48	Q49	Q51	Q52	Q53	Q54	Q55	Q56	
Q81																					σ_1	
Q82																						σ_1
Q83																						σ_1
Q84																						
Q85																						
Q86																						
Q87																						
Q88																						
Q89																						
Q91																						
Q92																						
Q93																						
Q94																						
Q95																						
Q96																						
Q97																						
Q98																						
Q99																						

여기서 모든 상태전이 중에 제어 가능한 사건들에 대한 수퍼바이저 제어를 통하여 항상 원하는 상태로 가도록 상태 궤환상사 $\Phi_{MK} : X_{MK} \rightarrow U_{MK}$ 를 다음의 표 5와 같이 설계하였다.

표 5-1 상태 궤환 상사(1/5)

Table 5-1 State feedback map(1/5).

	u11	u12	u13	u14	u15	u16	u17	u18	u19	u21	u22	u23	u24	u25	u26	u27	u28	u29	
u1	0	C	0	0	0	C	0	0	C	0	0	0	0	0	0	0	0	C	0
u2	0	C	0	0	1	C	1	1	1	C	C	0	0	1	0	1	1	1	1
u3	0	C	0	0	0	C	0	C	C	0	C	1	0	1	1	0	C		

표 5-2 상태 제한 상사(2/5)

Table 5-2 State feedback map(2/5).

	q11	q12	q13	q14	q15	q16	q17	q18	q19	q20	q21	q22	q23	q24	q25	q26	q27	q28	q29
u1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0
u2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
u3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
u5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	1	0	0	1	1
u6	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u7	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
u8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 5-3 상태 제한 상사(3/5)

Table 5-3 State feedback map(3/5).

	q31	q32	q33	q34	q35	q36	q37	q38	q39	q40	q41	q42	q43	q44	q45	q46	q47	q48	q49
u1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
u2	0	0	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1
u3	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	0	1	1	1	0	0	0	1
u4	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u6	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0
u7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

표 5-4 상태 제한 상사(4/5)

Table 5-4 State feedback map(4/5).

	q51	q52	q53	q54	q55	q56	q57	q58	q59	q60	q61	q62	q63	q64	q65	q66	q67	q68	q69
u1	1	1	1	0	1	0	0	0	0	1	1	1	0	1	0	0	0	0	0
u2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u4	1	0	0	1	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
u5	0	0	1	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u8	0	0	0	0	0	1	1	1	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1

표 5-5 상태 제한 상사(5/5)

Table 5-5 State feedback map(5/5).

	q71	q72	q73	q74	q75	q76	q77	q78	q79	q80
u1	1	1	1	1	0	1	0	0	0	0
u2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u3	0	0	1	0	1	1	0	0	0	1
u4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u6	1	0	0	1	1	0	1	0	0	0
u7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
u8	0	0	0	0	1	0	1	1	1	1

이는 제어가능한 사건 σ_1 및 $\sigma_2, \sigma_3, \sigma_4$ 그리고 σ_9, σ_{10} 및 σ_{11}, σ_{12} 에 대한 각각의 입력신호 u_1, u_2, u_3, u_4 그리고 u_5, u_6, u_7, u_8 를 enable과 disable의 제어를 수행하여 시스템의 상태가 원하는 상태로 제어되기 위한 상태제한 상사를 설계한 것이다.

3. 모의실험 및 검증

모의실험 제어기는 사건집합 $\{\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7, \sigma_8, \sigma_9, \sigma_{10}, \sigma_{11}, \sigma_{12}\}$ 을 사건집합 $\{a, b, c, d, e, f, g, h, i, j, k, l\}$ 으로 정의하여 실험하였다.

3.1 모의실험

시스템의 초기 시작 상태를 q_{72} 로 설정하고, 임의의 사건 스트링 aidbca를 제어기에 입력한다. 입력된 사건스트링에 의한 시스템의 상태전이 동작은 표 4를 참고하여 다음 그림 4와 같이 동작한다.

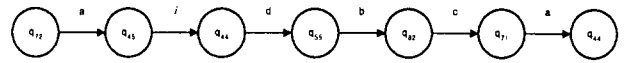


그림 4 상태 천이에 의한 시스템 동작

Fig. 4 System operation by state transition.

그림 4의 동작은 표 4의 상태천이를 따른 동작으로 상태 제한 상사에 의한 제어입력이 고려되지 않은 동작이다. 따라서 이러한 동작은 어떤 사건으로 인하여 시스템이 불안정한 상태에 도달할 수 있으므로 설계된 수퍼바이저 제어기에 사건 스트링을 입력하여 검증한다. 그림 5는 제어기에 사건 스트링을 입력한 그림이며, 그림 6은 수퍼바이저 제어기가 적용된 그림이다.

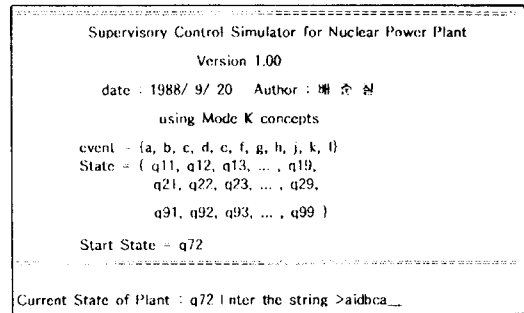


그림 5 수퍼바이저 제어기에 입력된 사건 스트링 Fig. 5 Input event string to supervisory control.

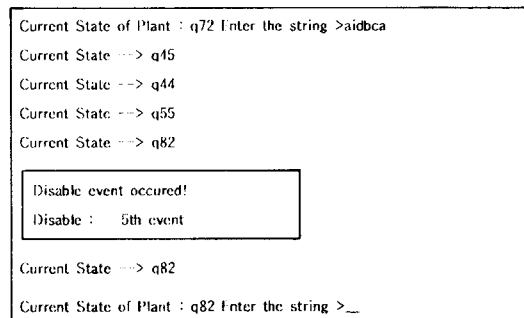


그림 6 사건 스트링 입력후의 결과 Fig. 6 Result of input event string

그림 6에서 입력된 사건 스트링중 첫 번째 사건인 a(HROD IN), i(RROD IL boron boration), d(RROD OUT), b(HROD OUT)는 시스템이 안정한 상태로 천이될 수 있는 사건이므로 수퍼바이저 제어기는 이 사건들을 모두 enable 시킨다. 그러나 다섯 번째 사건 c(RROD IN)는 그림 4와 같은 동작이 일어날 경우 시스템의 상태가 불안정해 지므로 수퍼바이저 제어기는 이 사건을 disable 시켜 사건 c(RROD IN)가 일어나지 못하도록 한다.

3.2 검증

모의실험은 초기 시작 상태에서 임의의 사건 스트링을 입력 받은 것으로부터 시작된다. 수퍼바이저 제어기법이 적용되지 않는 경우는 표 4에서 정의한 상태천이에 의해 시스템

이 동작하게 되지만 이러한 동작중 시스템이 불안정해 질 수 있는 상태로 동작 할 수 있으므로 시스템이 항상 안정한 상태를 유지 할 수 있도록 제어 입력을 가해야 한다. 기존의 원전에서는 운전원이 직접 이러한 조치를 취하였으나 설계된 수퍼바이저 제어기는 더 이상의 동작이 이루어 질 경우 시스템이 불안정해지는 사건을 검출하여 disable 시킨다. 따라서 설계된 수퍼바이저 제어기는 시스템이 항상 안정한 상태를 유지하며 동작할 수 있도록 제어입력을 가하는것을 그림 6에서 보여 주고 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 수퍼바이저 제어이론의 개념을 정립하고 이를 바탕으로 원전의 제한 계통제어에 적용하였다. 계통에 적용된 Mode K 기법은 이산사건 동적 시스템으로 모델링하기 위하여 부 시스템으로 노심과 제어봉을 고려하여 전향 제한 알고리즘을 위한 DEDS를 모델링 하였다. 사건 집합은 제어 가능한 사건집합과 제어불가능한 사건집합으로 분리하고 제어 가능한 사건에 대한 입력 신호를 제어하여 어떠한 경우에도 시스템의 상태가 우리가 원하는 상태로 제어되는 수퍼바이저 제어기를 설계하였다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부에서 시행한 '97 원자력 기초연구 과제 사업의 지원에 의해 수행 되었습니다. 또한 본 연구의 기술적 지원을 하신 고원석, 이건호, 최상철 님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 김명기, 홍승렬, "Supervisory Control 기법을 이용한 비상운전지원시스템 개념설계", 한국원자력학회 춘계 학술발표 논문집, 1996.
- [2] 김대길 "오토마타와 계산이론", 생능출판사, 1996.
- [3] 차달관 "이산사건 동적 시스템의 안정화 관리제어기 설계", 한양대학교, 1993.
- [4] J.I.Choi, "A Conceptual Model of Power Maneuverability for Digital Supervisory Limitation System," IEEE Trans. Nucl. Scie. Vol.42, No.6, 1995.
- [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.

저 자 소 개



배 준 철 (裵 俊 喆)

1975년 1월 8일 생. 1997년 경원대 전기공학과 졸업. 1999년 경원대 전기전자공학부 졸업(석사). 1999년-현재 경원대학교 전기전자공학부 박사과정.

Tel : (0342) 750-5492, Fax : (0342) 751-7885
E-mail : 93bae@web.kyungwon.ac.kr



최 중 인 (崔 重 仁)

1956년 10월 7일 생. 1979년 서울대학교 원자핵공학과 졸업. 1981년 동대학교 대학원 졸업(석사). 1987년 MIT 계측제어전공(공학박). 1988년-1989년 ABB/CE사 연구원. 1987년-1993년 한국원자력연구소 선임연구

원. 1993-현재 경원대학교 전기전자공학부 부교수.

Tel : (0342) 750-5349

E-mail : jichoi@mail.kyungwon.ac.kr