

보일러-터빈 설비에 대한 기준모델 추종 퍼지 제어시스템의 설계

(A Design of Reference Model Following Fuzzy Control
System for Boiler-Turbine Equipment)

정호성* · 황창선** · 황현준***

(Ho-Seong Jeong · Chang-Sun Hwang · Hyun-Joon Hwang)

요 약

보일러-터빈 설비는 화력발전소의 주원설비 내지 자가발전설비로서 보일러는 연료를 연소시켜 그 열을 수관내의 물에 전달하여 필요한 증기를 얻는 설비이고, 터빈은 보일러에서 보내온 고온, 고압의 증기를 팽창시켜 기계적 에너지로 변환하여 그 에너지로 발전기를 회전하여 전기를 얻는 장치이다. 보일러-터빈 설비는 전기적 출력과 드럼내의 증기압 및 수위를 적절히 조절함으로써 발전소의 안정된 운전을 도모하고 발전용 연료의 절감 및 이를 통한 공해 저감을 이루어야 할 필요가 있다. 본 논문에서는 이런 보일러-터빈 설비에 대한 제어시스템을 설계하는 한 방법으로서 기준모델 추종형 퍼지 제어시스템을 제안한다. 보일러-터빈 설비는 다변수 비선형 시스템으로서 일반적인 제어시스템 구성이 힘들지만, 오버슈트가 없으며 속응성이 좋은 기준모델을 선정하고 이 기준모델을 추종하도록 하는데 일반적인 1입력-1출력 퍼지제어기만을 적용하여도 기준신호에 대한 추종성 및 외란제거 능력 그리고 모델링 오차에 대한 강인성까지 나타내는 제어시스템의 설계가 가능하게 되었다. 따라서 전원설비로서의 보일러-터빈 설비에 대한 효율적인 제어시스템 설계 방법으로 활용될 수 있을 것이다.

Abstract

In this paper, a design method of the boiler-turbine control system in the coal fired power plant is proposed. We need to control electric output and drum pressure and water level in drum to guarantee stable operation and save energy for generating electricity and decrease air pollution in the boiler-turbine system. This boiler-turbine control system is composed of reference model part and model following part. The multivariable boiler-turbine system is separated into 3 SISO(Single Input Single Output) systems ap-

*정회원 : 연암공업전문대학 전자과 부교수

**정회원 : 부산대학교 공과대학 전기공학과 교수

***정회원 : 부산대학교 대학교 전기공학과 박사과정

접수일자 : 1996. 9. 20

plying the concept of relative gain matrix. Each 3 reference models for separated boiler-turbine system are composed of 1st order nominal plant and hysteresis integral control system and they make good dynamic response with no overshoot and fast rising time. Each fuzzy controller to follow as close as possible to the response of each reference model is designed. The robustness and the good tracking property can be achieved using SISO fuzzy controllers when there are modeling errors, disturbances and parameter perturbations. The effectiveness of the proposed design method is verified through simulations.

1. 서 론

보일러-터빈 제어시스템의 목적은 발전소의 안정적인 운전을 가능하게 하면서 연료를 절약하는 것이다. 즉 외란이 존재하거나, 파라미터가 변동하는 경우에도 최적의 추종 성능을 보장하는 것이라고 할 수 있다.¹⁾ 비례-적분 제어의 비례요소 대신 히스테리시스 요소를 사용함으로써 계단입력에 대하여 오버슈트가 일어나지 않고 속응성이 좋은 응답을 얻을 수 있는 방법이 있다.²⁾ 그러나, 보일러-터빈 시스템을 정확히 모델링하기도 힘들고, 동특성도 변화하므로 이러한 방법만으로는 외란이나 파라미터의 변동에 대해서 만족할 만한 제어 성능을 얻기 힘들다.¹⁾ ^{3) 5), 6)} 보일러-터빈 제어시에는 상태변수간에 상호 간섭까지 일어나므로 제어가 더 힘들다.⁶⁾ 강인성 제어 등에서는 파라미터의 불확실성 및 모델링 오차 등의 불확실성 등을 고려하여 제어를 설계함으로써, 이런 문제점들이 해결되었으나 수식이 복잡하고, 제어기의 차수가 상대적으로 높아지는 등의 단점으로 인해 실제 적용에 어려움이 있었다.¹⁾

이에 반해 퍼지 제어는 비선형성이 강하고 플랜트의 특성을 모델링하기가 어려운 경우 등에 적용되어 좋은 결과를 얻고 있지만 제어 성능이 설계자의 경험에 좌우되며, 다변수 제어시스템의 경우에는 제어 규칙수가 너무 증가하여 되어 실용상 문제가 된다.^{7) 8)}

본 논문에서는 다변수 시스템인 보일러-터빈 시스템에 1입력-1출력 시스템에 적용하는 일반적인 형태의 퍼지 제어기들만 사용하여 보일러-터빈 시스템의 특성이 변동하더라도 기준모델의 응답에 잘 추종할 뿐만 아니라 외란에도 강인한 기준모델 추종형 보일러-터빈 퍼지 제어시스템을 제시한다. 우선

3×3 다변수 보일러-터빈 시스템에 상대이득행렬을 적용하여 가장 큰 영향을 미치는 입력과 출력을 페어링(pairing)시킴으로써 3개의 1입력-1출력 제어시스템들이 병렬연결된 형태로 보일러-터빈 시스템을 재구성한다. 재구성된 각각의 1입력-1출력 제어시스템은 기준모델부와 기준모델 추종부로 이루어진다. 기준모델부는 1차의 공칭플랜트와 히스테리시스 요소 그리고 적분기로 이루어지며, 계단 입력에 대해 오버슈트가 없으면서 속응성이 좋은 기준모델 출력을 만들어낸다. 기준모델 추종부는 비례적분형 퍼지제어기를 이용하여 설계가 용이하면서도 외란이 존재하거나 보일러-터빈 시스템의 파라미터가 변동하는 경우에도 기준모델의 출력을 잘 추종한다. 또한 공칭 플랜트가 1차임에도 불구하고 고차인 전달함수행렬 요소를 가지는 보일러-터빈 시스템에 대해 만족할 만한 제어 결과를 얻을 수 있었다.

2. 보일러-터빈 시스템의 선형 모델

본 논문에서는 Bell과 Astrom의 160(MW) 화력 발전소에 대한 모델^{9), 10)}을 채택하였으며 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 x_1 &= -0.0018u_2x_1^{9.8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \\
 x_2 &= (0.073u_2 - 0.016)x_1^{9.8} - 0.1x_2 \\
 x_3 &= (141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1)/85 \\
 y_1 &= x_1, \\
 y_2 &= x_2 \\
 y_3 &= 0.05(0.13073x_3 + 100a_s + q_s/9 - 67.975)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

여기서 상태변수 x_1 은 드럼 증기압(kg/cm²)을, x_2 는 전기적 출력(MW)을, x_3 은 드럼내의 유체밀도

(kg/cm³)를 나타내며, 제어입력 u_1 은 보일러 연료밸브의 개도, u_2 는 증기밸브 개도, u_3 는 급수 밸브 개도를 나타낸다. 출력 y_3 는 드럼 수위(m)를 나타낸다. a_{cs} 는 증기의 질을 나타내는 계수이며, q_i 는 증기의 증발비(kg/s)를 나타낸다.

$$a_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (2)$$

$$q_i = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096$$

비선형모델은 제어기 설계시 적합치 못하므로 테일러 급수 근사화를 이용하여 동작점에서 선형화된다.⁶⁾ 선형화된 모델은 다음과 같은 상태변수 표현식으로 나타내어진다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{x} &= A\delta x + B\delta u \\ \delta y &= C\delta x + D\delta u \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 각 계수 행렬은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} A &= \partial f(x^0, u^0) / \partial x, \quad B = \partial f(x^0, u^0) / \partial u, \\ C &= \partial g(x^0, u^0) / \partial x, \quad D = \partial g(x^0, u^0) / \partial u, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\delta x = x - x^0, \quad \delta u = u - u^0, \quad \delta y = y - y^0$$

x^0, u^0, y^0 는 각각 공칭 동작점에서의 변수들의 값을 의미하며, 중간부하점을 공칭 동작점으로 간주한다. 이 모델은 경년 변화, 파라미터의 변화, 외란 등에 의해 변화하므로 동작점은 공칭 동작점의 70 [%]에서 130 [%] 사이에서 변동하는 것으로 가정하였으며, 계수행렬은 다음과 같다.

표 1. 각 동작점에서의 시스템 행렬 A의 값
Table 1. Values of system matrix A in various operating points

	1(70%)	2(80%)	3(90%)	4(100%)	5(110%)	6(120%)	7(130%)
a_{11}	-0.0017	-0.002	-0.0022	-0.0025	-0.0028	-0.0031	-0.0034
a_{12}	0	0	0	0	0	0	0
a_{13}	0	0	0	0	0	0	0
a_{21}	0.0372	0.0477	0.0585	0.0694	0.0806	0.0918	0.1033
a_{22}	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1	-0.1
a_{23}	0	0	0	0	0	0	0
a_{31}	-0.004	-0.0049	-0.0058	-0.0067	-0.0076	-0.0085	-0.0094
a_{32}	0	0	0	0	0	0	0
a_{33}	0	0	0	0	0	0	0

표 2. 각 동작점에서의 시스템 행렬 B의 값
Table 2. Values of system matrix B in various operating points

	1(70%)	2(80%)	3(90%)	4(100%)	5(110%)	6(120%)	7(130%)
b_{11}	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
b_{12}	-0.2337	-0.2716	-0.31	-0.349	-0.3885	-0.4285	-0.4689
b_{13}	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15	-0.15
b_{21}	0	0	0	0	0	0	0
b_{22}	9.4768	11.0129	12.5732	14.156	15.7576	17.3781	19.0156
b_{23}	0	0	0	0	0	0	0
b_{31}	0	0	0	0	0	0	0
b_{32}	-0.9784	-1.1181	-1.2579	-1.389	-1.5374	-1.6772	-1.8169
b_{33}	1.6588	1.6588	1.6588	1.6588	1.6588	1.6588	1.6588

표 3. 각 동작점에서의 시스템 행렬 C의 값
Table 3. Values of system matrix C in various operating points

	1(70%)	2(80%)	3(90%)	4(100%)	5(110%)	6(120%)	7(130%)
c_{11}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
c_{12}	0	0	0	0	0	0	0
c_{13}	0	0	0	0	0	0	0
c_{21}	0	0	0	0	0	0	0
c_{22}	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0
c_{23}	0	0	0	0	0	0	0
c_{31}	0.0095	0.0082	0.0071	0.0063	0.0057	0.0052	0.0048
c_{32}	0	0	0	0	0	0	0
c_{33}	0.0045	0.0045	0.0046	0.0047	0.0048	0.0049	0.0049

표 4. 각 동작점에서의 시스템 행렬 D의 값
Table 4. Values of system matrix D in various operating points

	1(70%)	2(80%)	3(90%)	4(100%)	5(110%)	6(120%)	7(130%)
d_{11}	0	0	0	0	0	0	0
d_{12}	0	0	0	0	0	0	0
d_{13}	0	0	0	0	0	0	0
d_{21}	0	0	0	0	0	0	0
d_{22}	0	0	0	0	0	0	0
d_{23}	0	0	0	0	0	0	0
d_{31}	0.2533	0.2533	0.2533	0.2533	0.2533	0.2533	0.2533
d_{32}	0.3587	0.4099	0.4612	0.512	0.5636	0.6149	0.6661
d_{33}	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014	0.014

3. 기준모델 추종형 보일러-터빈 제어 시스템의 설계

보일러-터빈 제어시스템은 입력, 출력 모두 3개씩인 다변수 시스템으로 상대이득행렬 RGM(Relative Gain Matrix)을 이용하여 입출력간에 가장 큰 영향을 미치는 것끼리 페어링(pairing)시킨 다음 각 페어링에 대해 원하는 응답을 만들어내기 위하여 기준모델을 구성하고, 일반적인 퍼지제어기를 이용하여 기준모델 출력을 추종시키는 구조로 이루어지며, 그림 1과 같은 블록도로 나타낼 수 있다.

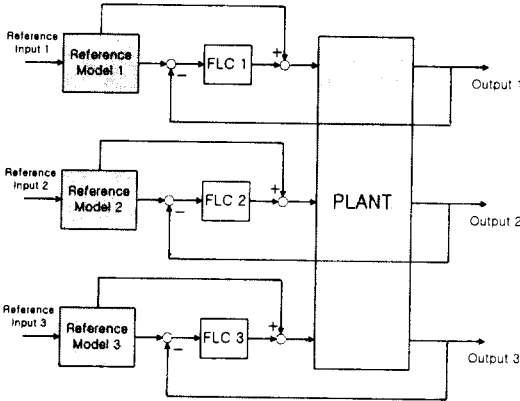


그림 1. 보일러-터빈 제어시스템의 구조
Fig. 1. A structure of boiler-turbine control system

3.1 기준모델의 구성¹⁶⁾

기준모델은 그림 2와 같은 히스테리시스 적분 제어시스템으로서 1차의 공칭플랜트와 적분기 및 히스테리시스 요소로 구성되며, 오버슈트가 없고 빠른 상승시간을 보이는 기준 응답을 만들 수 있다.^{2), 16)}

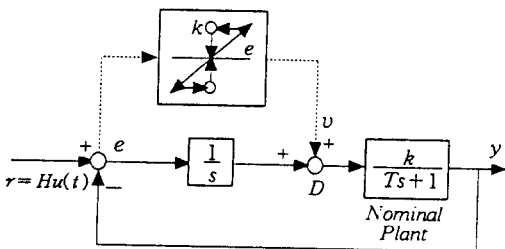


그림 2. 비선형요소를 이용한 기준모델
Fig. 2. A reference model using nonlinear element

그림 2의 D점에 시각 $t=0$ 일때 인가되는 v 의 크

기를 $+kH$, 목표에 도달하는 시점인 t_1 에서 인가되는 v 의 크기를 $-kH$ 로 하면 t_1 초 이후에 오버슈트는 상쇄된다. 그리고 t_1 초 이후에 오차가 발생하면 비선형 히스테리시스 요소의 출력은 선형적으로 증가 혹은 감소한다. 만약 오차가 증가하여 그 크기가 $+H$ 가 되면 비선형요소의 출력은 다시 $+kH$ 가 되고, 크기가 $-H$ 가 되면 비선형요소의 출력은 $-kH$ 가 된다. 그림 3은 오버슈트가 없는 응답이 얻어지는 원리를 도식적으로 보여주고 있다. 그림 2의 입력단 r 에 크기 H 인 계단입력인가시 응답 y 를 $C_{y1}(t)$ 라고 하고, D점에 크기 hH 의 계단외관 Ω 인가시 외관에 의한 응답을 $C_{y2}(t)$ 라 했을 때 그림 2의 기준모델로 채택된 히스테리시스 적분제어시스템은 플랜트의 파라미터가 변동하지 않는 경우에는 우수한 성능의 제어시스템이다. 그러나, 실제 플랜트에서 파라미터의 변동은 항상 존재하며, 이를 정확히 모델링하는 것은 불가능하다. 따라서 히스테리시스 적분제어시스템을 기준모델로서만 사용하여 원하는 기준응답을 얻고, 이 기준응답을 추종하는 제어기만 구성하면 보일러-터빈 시스템의 파라미터가 변동하더라도 원하는 출력을 얻을 수 있다.

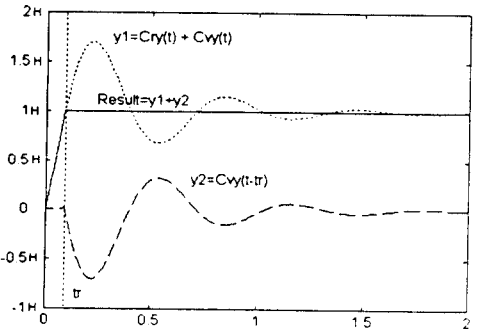


그림 3. 보상의 도식적 이해
Fig. 3. The schematic understanding of compensation

본 논문에서는 보일러-터빈 시스템에 대해 스텝 테스트한 결과로부터 얻은 1차 모델은 1차의 공칭플랜트로 채택한다. 이렇게 결정된 1차 공칭플랜트는 고차의 보일러-터빈 시스템을 정확하게 식별한 것은 아니지만, 추종부의 퍼지제어기가 이를 보상하여 기준모델에 추종하게 하므로, 양호한 응답 특성을

언을 수 있다. 1차 공칭플랜트의 시정수는 참고문헌¹⁵⁾의 결과에 의거하여 결정하였다.

3.2 상대이득행렬을 이용한 보일러-터빈 시스템의 SISO 시스템으로의 분리

SISO(Single Input Single Output) 시스템에서 퍼지제어기를 이용해서 제어시스템을 구성하기는 쉽다. 따라서 3×3 다변수 제어시스템인 보일러-터빈 시스템을 3개의 SISO시스템으로 분리가 가능하다면, 퍼지 제어기를 이용한 제어시스템 설계가 용이해진다. 다변수 제어시스템을 SISO 제어시스템으로 분리하기 위해서는 정상상태에서 보일러-터빈 제어시스템에 가장 큰 영향을 미치는 제어량과 조작량을 페어링시키는 것이 필요하다. 이 때 영향은 정상상태에서의 이득을 의미한다. 개루우프 정상상태 S_{ij} 는 j번째 조작량 u_j 를 제외한 모든 입력들이 일정할 때에 j번째 조작량에 대한 i번째 제어량의 비를 의미하며 S_{ij} 로 이뤄진 행렬을 정상상태이득행렬 SSGM(Steady State Gain Matrix)이라고 한다. 제어량과 조작량 사이의 관계는 다음과 같이 표현된다.

$$\Delta y = S \Delta u \quad (5)$$

여기서 Δy 는 제어량의 편차변수행렬이고, Δu 는 조작량의 편차변수행렬이며 S 는 SSGM를 의미한다. 보일러-터빈 시스템에서 Δy , S , Δu 는 식 (7)과 같이 표현된다. 식 (7)에서 $G_p(s)$ 는 보일러-터빈 시스템의 전달함수행렬을 의미한다.

$$\Delta y = \begin{bmatrix} \Delta y_1 \\ \Delta y_2 \\ \Delta y_3 \end{bmatrix}, S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}, \Delta u = \begin{bmatrix} \Delta u_1 \\ \Delta u_2 \\ \Delta u_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$S = \lim_{s \rightarrow 0} G_p(s) = G_p(0) \quad \text{혹은}$$

$$\begin{aligned} S_{11} &= \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, S_{12} = \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, S_{13} = \left. \frac{\Delta y_1}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2}, \\ S_{21} &= \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, S_{22} = \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, S_{23} = \left. \frac{\Delta y_2}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2}, \\ S_{31} &= \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_1} \right|_{u_2, u_3}, S_{32} = \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_2} \right|_{u_1, u_3}, S_{33} = \left. \frac{\Delta y_3}{\Delta u_3} \right|_{u_1, u_2}, \end{aligned} \quad (7)$$

SSGM은 식 (8)과 같이 근사적으로 구하는 경우가 많으며⁴⁾, 각 행에서 가장 큰 절대값을 갖는 제어량과 조작량의 조합을 선택한다.

$$S_{ij} \approx \frac{y(u_1, u_2, \dots, u_j + \Delta u_j) - y(u_1, u_2, \dots, u_j)}{\Delta u_j} \quad (8)$$

그러나, 이득 S_{ij} 는 서로 단위가 달라 선택한 조합이 올바르지 않을 수도 있으므로 정규화시킬 필요가 있다. Bristol 등이 제안한 상대이득행렬 RGM(Relative Gain Matrix)은 단위에 무관하도록 SSGM을 정규화하는 방법이며 식 (9)와 같이 정의된다.

$$\mu_{ij} = \frac{\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_u}{\left. \frac{\partial y_i}{\partial u_j} \right|_c} = \frac{\text{gain when the other loops are open}}{\text{gain when the other loops are closed}} \quad (9)$$

3차 이상의 시스템에 대한 RGM은 식 (10)과 같다.

$$\mu_{ij} = S_{ik} [(S^{-1})^T]_{kj} \quad (10)$$

항상 +1에 근접하는 RGM 요소를 선정하되, 페어링된 시스템이 불안정해지는 경우에는 그 다음으로 1에 근접한 페어링을 선정하면 된다. RGM 값에 의거하여 보일러-터빈 시스템은 3개의 SISO 시스템으로 분리하여 제어할 수 있다. 보일러-터빈 시스템의 SSGM은 표 5와 같다. RGM은 표 6과 같으므로, 처음 선택된 페어링은 $u_1 - y_2$, $u_2 - y_1$, $u_3 - y_3$ 이다.

표 5. 보일러-터빈 시스템에 대해 계산된 SSGM
Table 5. Calculated SSGM for boiler-turbine system

$$SSGM = \begin{bmatrix} 360.0000 & -139.6000 & -60.0000 \\ 249.8400 & 44.6776 & -41.6400 \\ 0.2353 & 0.5072 & 32.7294 \end{bmatrix}$$

표 6. 보일러-터빈 시스템에 대해 계산된 RGM
Table 6. Calculated RGM for boiler-turbine system

$$RGM = \begin{bmatrix} 0.3198 & 0.6844 & -0.0042 \\ 0.6790 & 0.3156 & 0.0054 \\ 0.0012 & 0.0000 & 0.9988 \end{bmatrix}$$

3.3 퍼지제어기의 설계

본 논문에서는 보일러-터빈 시스템을 RGM을

사용하여 3개의 SISO 시스템으로 분리한 후, 분리한 각 SISO 시스템에 대해 3.1절에서 언급한 적절한 기준모델을 채택하고, 퍼지제어기를 이용하여 보일러-터빈의출력이 기준모델의 응답에 추종하는 기준모델 추종형 퍼지제어시스템을 제안한다.

추론 비퍼지화 방법은 Mamdani의 min-max 방법, 중심법을 채택하였다.^{7), 8)} 퍼지제어기의 전건부 변수는 편차 E와 편차의 변화분 CE, 후건부 변수는 제어입력의 변화분 CU이다. 퍼지 제어기의 입출력 관계는(E, CE→CU)이다. E의 퍼지집합을 A, CE의 퍼지집합을 B, CU의 퍼지집합을 C라고 하면, 각 퍼지규칙은 다음과 같이 정의된다.⁸⁾

$$\mu_{A \text{ and } B, -C}(E, CE, CU) = \mu_A(E) \wedge \mu_B(CE) \wedge \mu_C(CU) \quad (11)$$

μ 는 멤버십 함수를 나타내고, \wedge 는 min-연산을 나타낸다. 식 (11)식에서 $i=1, 2, \dots, n$ 이고 n 은 제어규칙수를 나타낸다. 추론 결과 C' 를 E와 CE의 관측 데이터 E'와 CE'로 표현하면 식 (12)와 같다.

$$\mu_{C'(CU)} = \mu_A(E') \wedge \mu_B(CE') \wedge \mu_C(CU') \quad (12)$$

결과적으로 C'와 $\mu_{C'}$ 는 식 (13)과 같이 표현된다.

$$C' = C'_1 \cup C'_2 \cup \dots \cup C'_n \quad (13)$$

$$\mu_{C'}(CU) = \mu_{C'_1}(CU) \vee \mu_{C'_2}(CU) \dots \vee \mu_{C'_n}(CU)$$

\vee 는 max-연산을 의미한다. 최종적으로 얻어진 제어입력 CU*는 식 (14)와 같이 표현된다.

$$CU^* = \frac{\int CU \cdot \mu_{C'}(CU) d(CU)}{\int \mu_{C'}(CU) d(CU)} \quad (14)$$

3.2절에서 구한 RGM에 의거하여 1차적으로 선정된 페어링에 구성된 기준모델 추종형 퍼지제어시스템은 불안정하였기 때문에 $u_1 - y_1, u_2 - y_2, u_3 - y_3$ 를 페어링으로 잡았다. Niederlinski criterion^{9), 14)}을 적용시켜 보더라도 정당함을 확인할 수 있다. S가 SSGM일 때 Niederlinski criterion은 다음과 같다.

$$N = \frac{\det S}{\prod_{i=1}^n S_{ii}} < 0 \text{ 이면 시스템은 적분-가제어하지 못하다.}$$

보일러-터빈 시스템에 대해 처음 선정한 페어링 $u_1 - y_2, u_2 - y_1, u_3 - y_3$ 에 대한 N값을 구해보면 음의 값을 보이므로 이 페어링 조합은 선택해서는 안된다. 따라서 다음으로 RGM의 값이 1에 가까운 페어링 $u_1 - y_1, u_2 - y_2, u_3 - y_3$ 을 선택하여 다시 N 값을 조사한 결과 양의 값을 보이므로 이 페어링에 대해 SISO 퍼지제어기를 적용하기로 한다.

그러나 다변수 시스템인 보일러-터빈 시스템은 RGM으로 페어링시켜 3개의 SISO 시스템으로 분리시켰지만, 제어변수간 간섭 때문에 SISO 시스템에 일반적으로 사용되고 있는 표 7중 음영표시되지 않은 제어규칙만으로는 원하는 제어성능을 얻을 수 없다. 그림 4와 5에서 사용된 언어적 변수들은 NB는 negative big, NM은 negative medium, NS는 negative small, ZO는 zero를, PS는 positive small, PM은 positive medium, PB은 positive big을 의미한다. 멤버십 함수는 범종형의 경우와 응답 특성에서 큰 차이가 없고, 계산이 용이한 삼각형 형태를 사용하였으며, 전건부 변수의 양단에서는 오차나 오차의 변화분이 커질 경우에 대비하여 끝이 없는 사다리꼴 함수를 채택하였다.

시각 n에서의 출력을 Y_n , 설정치 R과 y_n 과의 편차를 E_n , 조작량을 U_n 이라 하면 편차의 변화량 CE와 조작량의 변화량 CU는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} CE &= E_n - E_{n-1} = (R - Y_n) - (R - Y_{n-1}) \\ &= Y_{n-1} - Y_n \\ CU &= U_n - U_{n-1} \end{aligned} \quad (15)$$

U 자체를 후건부 변수로 하는 위치형은 E의 적분 값을 전건부 변수로 사용하므로 계산이 복잡하고, 속도형에 비해 제어규칙 수가 많아지므로 E와 CE로부터 CU를 추론하는 구조를 채택하였다. 제어규칙은 스텝 응답을 사용하여 결정하였다. E=0이면서 CE<0이라면 출력이 상승중이므로 제어입력을 줄여야 한다. E<0이면서 CE>0이라면 현재의 출력이 기준 입력보다 크면서 출력이 하강중이므로 제

어입력을 증가시켜야 한다. 이러한 방식으로 SSGM 요소중에서 가장 큰 값을 가지는 페어링 $u_1 - y_1$ 에 대해 제어규칙을 작성한 것이 표 7이다. 표에서 점선으로 둘러쳐져 있으며 음영처리된 부분은 공칭플랜트와 플랜트의 차수가 상이한 경우에 대비한 제어규칙을 나타내며, 굵은 실선으로 둘러쳐져 있으며 음영처리된 부분은 다변수에서의 상태변수간의 상호작용에 의한 영향을 상쇄시키기 위한 제어규칙을 나타낸다. 그러나 보일러-터빈 시스템은 RGM으로 페어링을 시켜 3개의 SISO 시스템으로 분리시켰지만, 다변수 시스템에 SISO 제어를 그대로 적용시켰기 때문에 제어변수간 상호작용에 의하여 표 7의 음영처리된 부분을 제외한 나머지 제어규칙만으로는 원하는 제어성을 얻을 수 없다. 표 8에서는 나머지 페어링 $u_2 - y_2, u_3 - y_3$ 에 대한 제어규칙을 나타내고 있다. 표 8에서 * 표시된 부분을 보면 $E < 0$ 이고 $CE < 0$ 인데, 상대이득행렬에서 음의 값을 보이는 상태이며 SISO 시스템의 경우 제어입력을 크게 하면 관련된 출력은 오히려 감소함을 의미하므로, 음의 값을 가지는 페어링은 배제해야 하지만 다변수 시스템에서는 SISO 시스템에서와 반대로 작용하는 형태로 제어입력을 내주면 된다.

표 7. 정상상태이득행렬의 요소중에서 가장 큰 값을 가지는 페어링 $u_1 - y_1$ 에 대한 제어규칙표
Table 7. A table of control rule for pairing $u_1 - y_1$ with the biggest element of steady-state gain matrix

CE \ E	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
PB				NB	NM		
PM			NM	NM			
PS		NM	NM	NS	ZO		PM
ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NS	NM		ZO	PS	PM	PM	
NM				PM	PM		
NB			PM	PB			

RGM에서 음의 값을 보이는 것은 제어 입력을 크게 하면 관련된 출력은 오히려 감소함을 의미하므로, 표1에서의 제어규칙에 반대되는 성격의 제어규칙을 부가한다. 따라서 $u_2 - y_3$ 와 $u_3 - y_2$ 의 페어링에

대해서는 표 8의 제어규칙을 적용하였다. 표 7에서 입력과 출력의 퍼지 변수는 모두 7개씩으로 구성된 것에 비해 표 8에서 퍼지변수를 5개씩으로 구성한 것은 서로 간섭이 있는 경우에 7개의 퍼지변수를 사용하면 제어규칙수가 너무 많아지기 때문이다.

표 8. 정상상태이득행렬의 요소중에서 가장 큰 값을 가지는 페어링을 제외한 페어링 $u_2 - y_2, u_3 - y_3$ 에 대한 제어규칙표

Table 8. A table of control rule for pairings $u_2 - y_2, u_3 - y_3$ with other element except the biggest element of steady-state gain matrix

CE \ E	NB	NS	ZO	PS	PB
PB	NS		PB		PB
PS	NS	ZO	PS	PS	PS
ZO	NB	NS	ZO	PS	PB
NS	NS(*)	NS	NS	ZO	PS
NB	NB		NB		PS

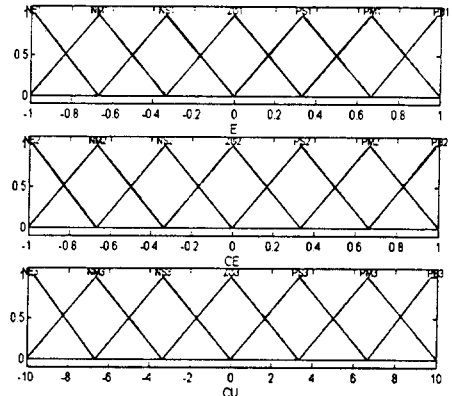


그림 4. 페어링 $u_1 - y_1$ 에 대한 멤버십함수
Fig. 4. Membership functions for pairing $u_1 - y_1$

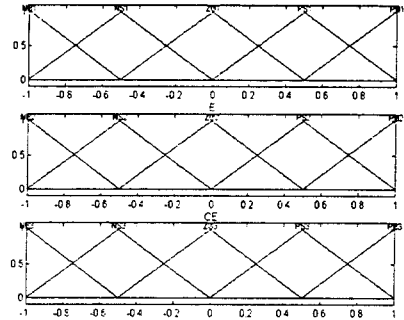


그림 5. 페어링 $u_2 - y_2, u_3 - y_3$ 에 대한 멤버십함수
Fig. 5. Membership functions for pairing $u_2 - y_2, u_3 - y_3$

4. 시뮬레이션 및 고찰

그림 6은 보일러-터빈 제어시스템의 전체 블록도이다. RGM에 의하여 선정된 페어링은 $u_1 - y_1$, $u_2 - y_2$, $u_3 - y_3$ 가 된다. 입력 u_1 은 보일러 연료 조절기 위치, 출력 y_1 은 드럼 증기압이다. 입력 u_2 는 증기량 조절 밸브 위치, 출력 y_2 는 전기적 출력이며, 입력 u_3 는 급수 조절기의 위치이고, 출력 y_3 는 드럼 수위이다. 그림 7에서는 실선은 공칭 동작점 부하의 100%일때 각 출력단에 계단외란 $u(t-1)$ 이 존재시 본 논문의 방법에 의한 제어 결과를 나타내고, 점선은 외란이 없는 경우의 LQG/LTR 방법⁶⁾,¹⁰⁾에 의한 제어 결과를 비교하여 나타내고 있다. 보일러-터빈 시스템의 수식모델에 근거한 LQG/LTR 방법은 수식이 복잡하며 파라미터의 변동분을 고려하지 못하면 강인성이 저하된다. 반면에 제시된 기준모델 추종형 퍼지제어시스템은 보일러-터빈의 정상상태에서의 입출력 데이터를 이용하여 제어시스템 설계가 용이할 뿐 아니라 보다 강인하였다. 제시된 방법에 의한 결과가 외란이 존재함에도 불구하고 외란이 없

는 LQG/LTR 방법에 의한 결과보다 속응성이 좋고 외란에 대해 더 강인함을 알 수 있다. 이것은 제어시스템 구조가 모델추종형인데다 동특성 변동시 퍼지 제어기가 보상할 수 있기 때문으로 생각된다.

이상의 시뮬레이션은 *MATLAB Simulink* 및 *Fuzzy Logic Toolbox*를 사용하였다¹²⁾. 시뮬레이션을 통해 본 논문에서 제시한 기준모델 추종형 보일러-터빈 퍼지제어시스템이 강인한 외란 제거 특성과 오버슈트가 거의 없는 양호한 추종성을 보임을 확인하였다. 그리고 시정수가 큰 드럼 수위 경우에는 제어 입력 변동분이 다른 제어입력의 변동분에 비해 조금 커지는데 이것은 1차 공칭플랜트를 사용하였기 때문이다. 본 논문에서의 제어시스템 구조는 그대로 사용하면서 2차 이상의 공칭플랜트를 선정하는 간단한 방법이 개발되면 보다 양호한 제어 결과가 예상된다.

5. 결론

본 논문에서는 SISO시스템에 대한 기준모델 추종형 퍼지제어시스템을 SSGM과 RGM 등 정상상태

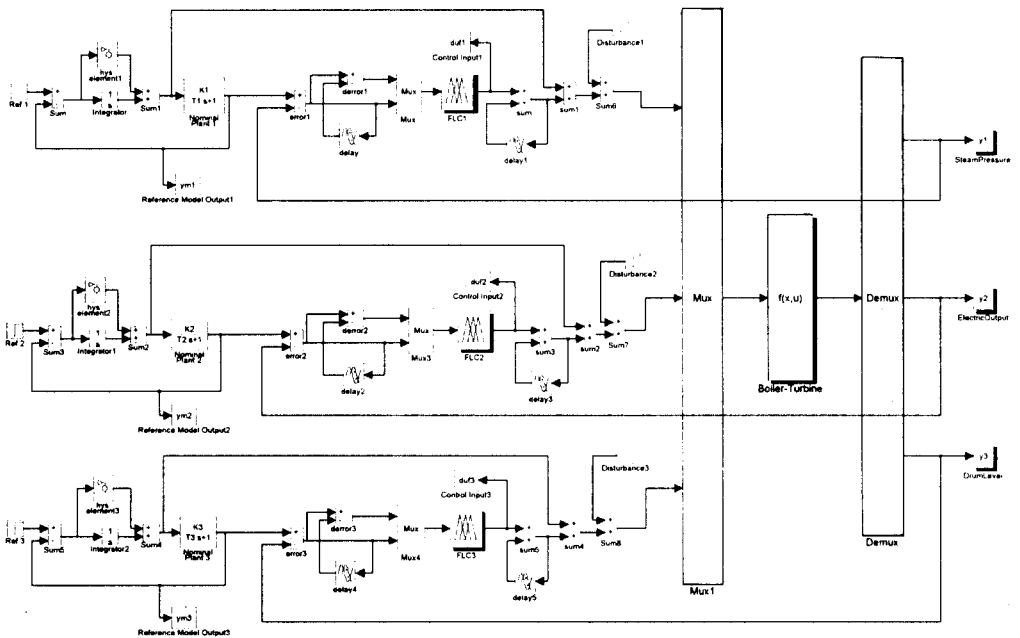
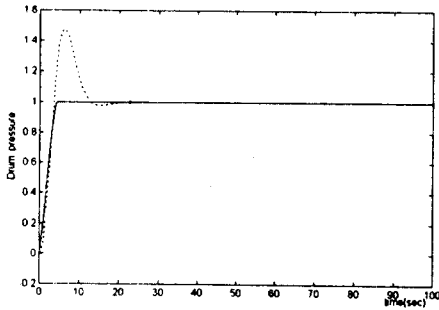
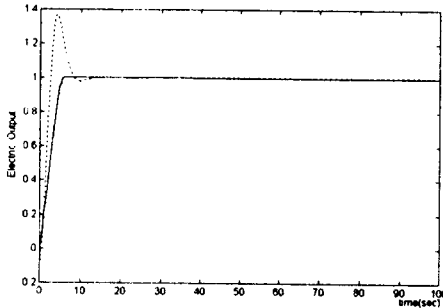


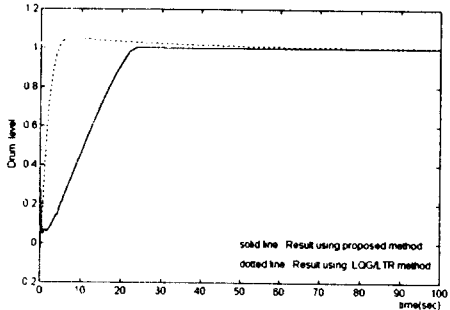
그림 6. 보일러-터빈 제어시스템의 블록도
Fig. 6. A block diagram of boiler-turbine control system



(a) Drum pressure (solid line : proposed method, dotted line : LQG/LTR method)



(b) Electric output (solid line : proposed method, dotted line : LQG/LTR method)



(c) Drum level (solid line : proposed method, dotted line : LQG/LTR method)

그림 7. 계단외란 $d_1(t) = d_2(t) = d_3(t) = u(t-1)$ 존재시 공칭 동작점 부하의 100[%]에서 제안된 방법과 LQG/LTR방법에 의한 계단응답의 비교

Fig. 7. A comparison between step response using a LQG/LTR method and proposed method at 100 [%] load of nominal operating point when disturbances are $d_1(t) = d_2(t) = d_3(t) = u(t-1)$

정보만을 이용하여 기존의 방법에 비해 시행착오를 줄이면서 3×3 다변수 시스템인 보일러-터빈 시스템에 확대적용시켰고, RGM값에 근거하여 제어변수

간 상호작용을 고려한 퍼지 제어를 적용하므로써 기존의 방법에 비해 설계 과정이 간단하면서도 다음과 같은 양호한 제어성능을 나타내었다.

첫째, 얻어진 응답은 오버슈트가 거의 없으며, 속응성이 좋다.

둘째, 파라미터 변동분을 따로 고려하지 않더라도 외란에 대해 강인할 뿐만 아니라, 기준모델응답에 대해 양호한 추종성능을 나타내었다.

앞으로 RGM을 사용하여 다변수 시스템을 SISO 시스템으로 분리하였을 때의 영향을 정량적으로 평가해서 이것에 근거하여 제어규칙을 작성할 수 있는 방법과 플랜트의 시정수가 크고, 불감 시간이 비교적 큰 경우에 대한 공칭 플랜트 구성 방법 그리고 입출력 수가 같지 않은 다변수 시스템으로 확장하는 방법등에 대한 연구가 더 진행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) M. Morari, E. Zafirov, Robust process control, Prentice-Hall, 1989.
- 2) 中野 道雄, 邦信, 古賀 高志, "非線形モデルを持つ規範モデル追従システム", 日本電氣學會論文集 D, Vol. 114-D, No. 10, pp. 1032~1037, 1994.
- 3) P. J. Campo, M. Morari, "Achievable Closed-Loop Properties of System Under Decentralized Control: Conditions Involving the Steady-State Gain," IEEE Trans. Automat. Contr., vol.AC-39, no.5, May 1994.
- 4) T.E. Marlin, Process Control, McGraw-Hill, 1995.
- 5) 朴太洪, 裴相旭, 朴貴泰, "상대이득행렬을 이용한 보일러의 퍼지 자기구성 제어기 설계", 電氣學會論文集, Vol.44, No.3, pp.339~347, 1995.
- 6) 權旭鉉, 金相禹, 朴符堅, 金恩基, "개선된 LQG/LTR 방법에 의한 보일러-터빈 제어 시스템의 설계", 電氣學會論文集, Vol.39, No.2, pp.199~209, 1990.
- 7) 박민용, 최항식 역, 퍼지 제어 시스템, 대영사, 1990.
- 8) M. Sugeno ed., Industrial applications of fuzzy control, North-Holland, 1985.
- 9) R.B. Bell, K.J. Aström, "Dynamic models for boiler-turbine-alternators units: data logs and parameter estimation for a 160[MW] unit," Report TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden, 1987.
- 10) H. K. Nam, Modeling and Control System design study of a coal fired power plant, Ph. D dissertation, The Univ. of Texas at Austin, 1986.
- 11) R. Johansson, System modeling and identification,

- Prentice-Hall, 1993.
- 12) J. S. Roger Jang, Ned Gulley, Fuzzy Logic Toolbox, The MathWorks, Inc., 1995.
- 13) P. Grosdidier, M. Morari, B. R. Holt, "Closed-Loop Properties from Steady-State Gain Information," Ind. Eng. Chem. Fundam., vol.24, no.2, pp.221~235, 1985.
- 14) P. Grosdidier, M. Morari, "The Interaction Measure," Ind. Eng. Chem. Res., vol.26, pp.1193~1202, 1987.
- 15) 黃昶善, 鄭浩誠, 南慶源, "퍼지 제어를 이용한 오버슈트가 없는 모델 추종 제어 시스템의 한 설계", 電氣學會 論文集, Vol. 45, No. 12, pp. 1794~1800.
- 16) H. S. Jeong, A Study on Design of Nonlinear Reference Model Following Multivariable Fuzzy Control System, Ph. D dissertation, Pusan National Univ. at Pusan Korea, 1997.

◇ 著 者 紹 介 ◇



정 호 성(鄭浩誠)

1960년 1월21일생. 1983년 부산대학교 공과대학 전기기계공학과 졸업. 1985년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1988년 포항제철 기술연구소 주임연구원. 1991년 산업과학기술연구소 제어연구부 주임연구원. 1997년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 연암공업전문대학 전자과 부교수.



황 현 준(黃現俊)

1969년 8월20일생. 1992년 부산대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1995년 부산대학교 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 부산대학교 대학원 전기공학과 박사과정, 부산대 강사.



황 창 선(黃昶善)

1932년 1월12일생. 1955년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1969년 일본 동경공대 대학원 제어공학과 졸업(공학석사). 1972년 미국 알라바마 대학 수학. 1974년 일본 동경공대 객원연구원. 현재 부산대학교 공과대학 전기공학과 교수.