

화력발전 보일러-터빈 시스템을 위한 Dynamic Matrix Control(DMC)의 계단응답모델 선정에 관한 연구

(A Study on the Step Response Model Development of a Dynamic Matrix Control(DMC) For Boiler-Turbine Systems in a Fossil Power Plant)

문운철*

(Un-Chul Moon)

요 약

동역학행렬제어(Dynamic Matrix Control) 기법은 각종 산업 현장에서 가장 활발하게 적용되고 있는 고급 제어 기법으로, 최근에는 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다. 일반적으로 동역학행렬제어에서는 대상 플랜트의 거동을 묘사하기 위하여 계단 응답 모델을 이용한다. 본 논문에서는 화력발전의 보일러-터빈 시스템에 동역학행렬제어 기법을 적용하기 위하여, 두 가지 방식으로 선정된 계단응답모델의 제어 성능을 비교하였다. 먼저 주어진 대상 플랜트의 정확한 비선형 모델을 알고 있다고 가정하여 이의 선형화를 통한 계단응답 모델과 대상시스템의 계단응답 실험을 통하여 얻어진 두 가지 계단응답 모델의 유효성을 비교 분석하였다. 분석 결과 실험적인 계단 응답 모델을 사용한 경우가 우월한 제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

Abstract

This paper presents comparison results of Step Response Model of Dynamic Matrix Control(DMC) for a drum-type boiler-turbine system of a fossil power plant. Two possible kinds of step response models are investigated in designing the DMC, one is developed with the linearization of theoretical model and the other is developed with the process step-test data. Then, the control performances of each model-based DMC are simulated and evaluated. It is observed that the simulation results with the step-response model based on the test data show satisfactory results, while the linearized model is not suitable for the control of boiler-turbine system.

Key Words : Dynamic Matrix Control(DMC), Boiler-Turbine System, Step Response Model

1. 서 론

* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 조교수
Tel : 02-820-5286, Fax : 02-825-1584
E-mail : ucmoon@cau.ac.kr
접수일자 : 2006년 4월 18일
1차심사 : 2006년 4월 25일
심사완료 : 2006년 5월 16일

모델 예측 제어(Model Predictive Control, MPC)는 일정한 미래 구간 내에서 예측된 출력을 바탕으로 하여, 순차적으로 제어 입력을 계산하는 제어 알

고리즘을 통칭한다[1]. 계산된 결과로 미래 구간에서의 제어 입력들이 구해지는데, 이 입력들 중 오직 현재 시간에서 사용되는 입력만이 플랜트에 적용된다. 이러한 계산 과정은 다음 이산시간에도 되풀이된다. 기존의 제어기법과는 달리, MPC는 실제 공정에서 흔히 대두되는 입출력 변수들의 제약 조건을 고려할 수 있는 이점을 가지고 있으며, 최근에는 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다[1-2].

이 중 동역학행렬제어(Dynamic Matrix Control, DMC) 알고리즘은 가장 널리 알려져 있는 MPC 알고리즘 중에 한 종류로서, 제어하고자 하는 시스템의 계단 응답 모델을 이용한다. DMC는 매 이산 시간마다 매우 많은 계산량을 필요로 하기 때문에 주로 거동이 느린 화학 플랜트 시스템을 대상으로 수많은 적용사례가 보고되었으며, DMC+, SMC, RMPCT, HIECON, PFC, OPC 등, 많은 종류의 상업적인 소프트웨어가 개발되어 상업적으로도 많은 성공을 거두고 있다[1-2].

보일러-터빈 시스템은 발전기의 터빈을 회전시키기 위해 고압의 증기를 공급하는 역할을 한다. 보일러-터빈 시스템 제어의 목표는 드럼 내부의 압력과 수위를 유지하면서 시시각각 변하는 부하의 수요를 충족시키는 데 있다. 이러한 보일러-터빈 시스템은 일반적으로 비선형 특성을 갖는 다중입출력(Multi-Input Multi-Output, MIMO) 시스템으로 묘사되고 있다[3].

보일러-터빈 시스템의 강한 비선형성과 넓은 동작 범위로 인해 많은 보일러 시스템 제어 공학자들의 다양한 연구가 행해져 왔다. Hogg와 Ei-Rabaie는 보일러 시스템에 자기조정(self tuning) GPC(Generalized Predictive Control) 적응제어(adaptive control)를 적용하였다[4]. Cori와 Maffezzoni는 LQG(Linear Quadratic Gaussian) 제어를 적용하였고[5], Pellegrinetti와 Bentsman는 보일러를 위한 강인제어를 디자인하였으며[6], Ben-Abdenour와 Lee는 LQG/LTR(Linear Quadratic Gaussian with Loop transfer Recovery) 방법을 적용하였다[7]. 최근에 Tan 등은 강인제어를 PI제어기로 근사화하여 설계하였으며[8], 다양한 종류의 인공지능 기술 또한 보일러 터빈 시스템 제어에 적용되어 왔다

[9-12]. 그러나 이와 같은 제어기법들은 실제 공정에서 다양하게 발생되는 입출력변수의 제약조건을 직접적으로 고려하지 못 한다는 문제점이 있다.

많은 상업적인 성공사례에 힘입어, DMC기법은 조만간 전력산업에의 적용이 본격적으로 시도될 것으로 예측된다. 전력 시스템 분야에서는 Rovnak과 Corlis가 초임계압 보일러(Super-critical Boiler)에 대한 DMC의 모의 실험 결과를 제시하였다[13]. Sanchez 등은 화력발전의 스팀 온도 제어 문제에 DMC를 적용하고, PID 제어기보다 우월한 성능을 나타냄을 확인하였다[14].

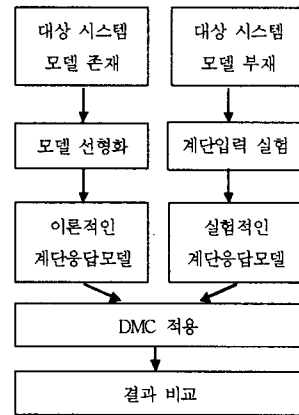


그림 1. 연구의 진행도
Fig. 1. The research procedure

본 논문에서는 드럼 타입 보일러-터빈 시스템의 DMC 적용에 대한 실질적인 고려사항을 연구하였다. DMC의 적용에 있어서 가장 중요한 사항 중의 하나는, 시스템의 거동을 신뢰성 있게 묘사할 수 있는 계단 응답 모델(Step Response Model)을 개발하는 것이다. 본 논문에서는 일반적으로 알려져 있는, 두 가지의 모델 개발 방법에 대하여, 실제 적용에 대한 가능성을 검증하였다. 먼저 첫 번째 방법은 신뢰할 만한 대상 시스템의 수학적 비선형 모델이 주어졌을 때, 그 모델을 선형화한 후 이로부터 설계할 수 있는 계단응답모델이다. 다른 방법은 실험적인 데이터를 바탕으로 계단응답 모델을 구하는 방법이다. 본 연구에서는 두 모델의 차이를 해석하고, 각각의 DMC를 설계하여 제어 성능의 차이를 평가,

논의하였다. 본 연구의 진행 흐름을 그림 1에 나타내었다.

2. 보일러 터빈 시스템 모델

2.1 비선형 보일러 터빈 시스템 모델

본 논문에서는 드럼 타입 보일러-터빈 시스템을 위한 비선형 모델 중에서 Bell과 Åström이 제안한 모델[3]을 실제 플랜트로 가정하였다. 이는 160[MW] 보일러-터빈 발전기 모델로서, 다음과 같은 3차 MIMO 비선형 상태 방정식으로 표현된다[3].

$$\dot{x}_1 = -0.0018u_2x_1^{9/8} + 0.9u_1 - 0.15u_3 \quad (1)$$

$$\dot{x}_2 = [(0.73u_2 - 0.16)x_1^{9/8} - x_2]/10 \quad (2)$$

$$\dot{x}_3 = [141u_3 - (1.1u_2 - 0.19)x_1]/85 \quad (3)$$

$$y_1 = x_1 \quad (4)$$

$$y_2 = x_2 \quad (5)$$

$$y_3 = 0.05(0.13073x_3 + 100\alpha_{cs} + q_e/9 - 67.975) \quad (6)$$

$$\alpha_{cs} = \frac{(1 - 0.001538x_3)(0.8x_1 - 25.6)}{x_3(1.0394 - 0.0012304x_1)} \quad (7)$$

$$q_e = (0.854u_2 - 0.147)x_1 + 45.59u_1 - 2.514u_3 - 2.096 \quad (8)$$

3개의 상태변수 x_1 , x_2 그리고 x_3 는 각각 드럼 내의 증기 압력(P[kg/cm²]), 전기적 출력(E[MW]) 그리고 드럼 내부의 유체 증기 밀도(f[kg/m³])를 나타낸다. 3개의 출력 y_1 , y_2 그리고 y_3 는 각각 드럼 내의 증기 압력(x_1), 전기적 출력(x_2) 그리고 드럼 내부의 수위(L[m])를 나타낸다. 드럼 내의 수위를 나타내는 y_3 는 증기의 질량비(α_{cs})와 증발율(q_e)을 통하여 구할 수 있다.

세 개의 입력 u_1 , u_2 , u_3 는 제어 밸브의 개폐 정도를 나타내는 값으로서, 각각 연료의 양, 터빈에 공급하

는 증기의 양 그리고 드럼 내의 물의 공급량을 나타낸다. 이 밸브들의 위치는 [0, 1]사이 값으로 정규화되었으며, 각 입력의 변화량은 물리적인 특성에 의하여 다음과 같은 제약조건이 존재한다.

$$-0.007 \leq du_1/dt \leq 0.007 \quad (9)$$

$$-2.0 \leq du_2/dt \leq 0.02 \quad (10)$$

$$-0.05 \leq du_3/dt \leq 0.05 \quad (11)$$

2.2 비선형 모델을 이용한 계단 응답 모델

먼저 보일러 터빈 시스템의 신뢰할만한 수학적 모델을 미리 알고 있다고 가정한다. 즉 (1)~(8)의 비선형 모델을 알고 있다고 가정한 경우이다. 이 경우, 비선형 모델의 선형화를 통하여 DMC에서 이용할 계단응답 모델을 구할 수 있다.

(1)~(8)에 나타난 비선형 모델을 일반적인 동작점 $Y_0=(y_{10}, y_{20}, y_{30})$, $X_0=(x_{10}, x_{20}, x_{30})$, $U_0=(u_{10}, u_{20}, u_{30})$ 에서 테일러 급수의 1차 전개를 이용하여 선형화하면 다음과 같이 유도된다.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (12)$$

$$Y(t) = CX(t) + DU(t) \quad (13)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{0.0162}{8}u_{20}x_{10}^{1/8} & 0 & 0 \\ (\frac{6.57}{80}u_{20} - \frac{1.44}{80})x_{10}^{1/8} & -\frac{1}{10} & 0 \\ (\frac{0.19}{85} - \frac{1.1}{85}u_{20}) & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.0018x_{10}^{9/8} & -0.15 \\ 0 & \frac{0.73}{10}x_{10}^{9/8} & 0 \\ 0 & -\frac{1.1}{85}x_{10} & \frac{141}{85} \end{bmatrix} \quad (15)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ (5\frac{\partial}{\partial x_1} a_{cs} + \frac{0.05}{9}\frac{\partial}{\partial x_1} q_c) & 0 & (0.065 + 5\frac{\partial}{\partial x_3} a_{cs}) \end{bmatrix} \quad (16)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2533 & 0.00474x_{10} & -0.014 \end{bmatrix} \quad (17)$$

이때 Y, X, 그리고 U는 각 동작점에서의 변화량들이다. 만일 동작점 $Y_0=(115, 85, 0)$, $X_0=(115, 85, 402.759)$, $U_0=(0.4147, 0.7787, 0.5436)$ 를 가정하여 계산하면, A, B, C, D는 (14)~(17)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$A = \begin{bmatrix} -0.002854 & 0 & 0 \\ 0.083152 & -0.1 & 0 \\ -0.007842 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$B = \begin{bmatrix} 0.9 & -0.374591 & -0.15 \\ 0 & 15.191754 & 0 \\ 0 & -0.148126 & 1.658824 \end{bmatrix} \quad (19)$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0.007566 & 0 & 0.004257 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$D = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0.2533 & 0.543056 & -0.014 \end{bmatrix} \quad (21)$$

이를 바탕으로 전체 시스템의 입출력 전달함수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$Y(s) = [C(sI - A)^{-1}B + D]U(s) \quad (22)$$

$$= \begin{pmatrix} G_{11} & G_{12} & G_{13} \\ G_{21} & G_{22} & G_{23} \\ G_{31} & G_{32} & G_{33} \end{pmatrix} U(s) \quad (23)$$

이 때 각 입출력의 전달함수 G_{ij} 는 다음과 같이 계

산된다.

$$G_{11} = \frac{0.9s + 0.09}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (24)$$

$$G_{12} = \frac{-0.3746s - 0.03746}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (25)$$

$$G_{13} = \frac{-0.15s - 0.015}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (26)$$

$$G_{21} = \frac{-1.388 * 10^{-17}s + 0.04402}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (27)$$

$$G_{22} = \frac{15.19s + 0.0122}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (28)$$

$$G_{23} = \frac{-0.007337}{s^2 + 0.102s + 0.0002009} \quad (29)$$

$$G_{31} = \frac{0.2533s^3 + 0.03078s^2 + 0.0005244s - 2.016 * 10^{-6}}{s^3 + 0.102s^2 + 0.0002009s} \quad (30)$$

$$G_{32} = \frac{0.5431s^3 + 0.05266s^2 - 0.0001576s + 7.018 * 10^{-7}}{s^3 + 0.102s^2 + 0.0002009s} \quad (31)$$

$$G_{33} = \frac{-0.014s^3 + 0.005393s^2 + 0.000698s + 1.872 * 10^{-6}}{s^3 + 0.102s^2 + 0.0002009s} \quad (32)$$

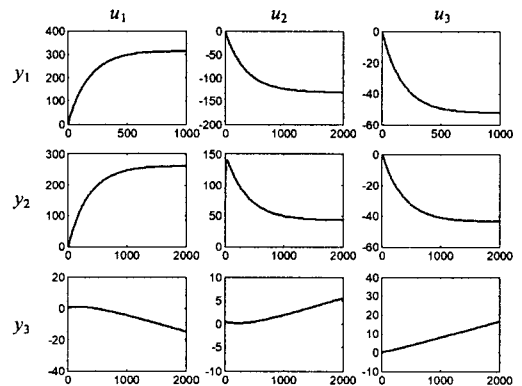


그림 2. 선형화를 이용한 계단응답 모델
Fig. 2. Step response model by linearization

(24)~(32)를 사용하면, 대상 시스템의 u_1, u_2, u_3 에 각각 크기 1인 입력을 인가한 계단응답 모델은 그림 2와 같이 표현된다. 그림에서 가로축은 시간, 그리고 세로축은 3가지 출력 y_1, y_2, y_3 를 나타낸다. 그림에서 3개 열은 각각 계단입력 u_1, u_2, u_3 에 대응되는 반응들이다.

2.3 실험적인 계단 응답 모델

신뢰할만한 수학적인 모델을 이용할 수 없는 경우, 실험적인 데이터로부터 계단 응답 모델을 구하는 것이 일반적이다. 즉 실제 대상 시스템에, 계단 입력이나 확률적 이산 신호(Pseudo Random Binary Signal) 등을 직접 입력하여, 그 때의 출력 반응을 계단 응답 모델로서 이용하게 된다[1,15].

본 논문에서는 (1)~(8)을 실제 플랜트로 가정하여, 실험적인 계단응답 모델을 설정하였다. 먼저, 선형화된 모델과 같은 동작점인 $Y_0=(115, 85, 0)$, $X_0=(115, 85, 402.759)$, $U_0=(0.4147, 0.7787, 0.5436)$ 에서, 세 개의 입력 u_1, u_2, u_3 에 계단입력을 독립적으로 인가하여 각각의 입력에 대응되는 3가지의 반응을 저장하였다. 그 후 간단한 정규화를 통하여, 플랜트의 계단 응답 모델을 설정하였다.

그림 3은 [0, 1]로 정규화된 제어 밸브의 위치, u_1, u_2, u_3 에 각각 최대 밸브 개폐량의 1[%], 즉 0.01 크기의 계단 입력을 비선형 모델 (1)~(8)에 독립적으로 인가하였을 경우의 응답 모델을 나타낸다.

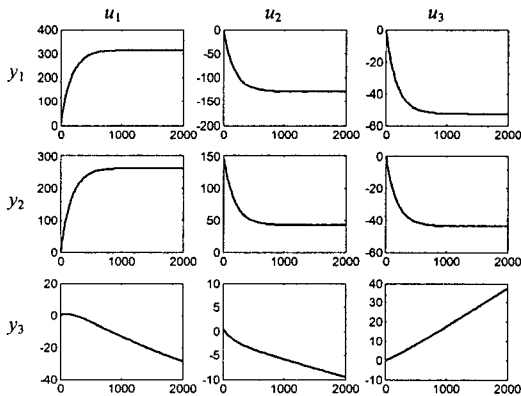


그림 3. 실험적인 계단응답 모델
Fig. 3. Step response model by the process test

그림 2 혹은 그림 3의 9가지 계단응답 모델은 각각 이산화되어 행렬 형태인 동력학 행렬(Dynamic Matrix)로 저장되며, 이는 DMC에서 비선형 보일러 터빈 시스템의 거동 묘사에 이용된다.

그림 2와 그림 3의 비교를 통해, 두 가지의 계단응답 모델의 차이를 발견할 수 있다. 두 모델의 출력 y_1, y_2 는 거의 비슷하지만, y_3 의 경우 상당한 차이가 나타난다. 모델 G_{31} 과 G_{33} 에서는 약간의 기울기 차이를 보이고, 발전기 증기의 양에 대한 드럼 내의 수위의 반응을 나타내는 G_{32} 의 경우는 명확한 차이를 나타낸다. 즉 드럼 내의 증기가 감소함에 따른 수위의 높이에 대한 선형화 모델의 반응은 그림 1에서 증가하는 반면, 실험적 모델의 반응은 그림 2에서 감소하는 것을 알 수 있다. 물리적인 관점에서 보면, 증기가 줄어들어 따라 장기적으로는 수위가 감소하게 되므로, 선형화된 모델은 G_{32} 의 거동 표현에 있어서 오차를 가지고 있음을 알 수 있다.

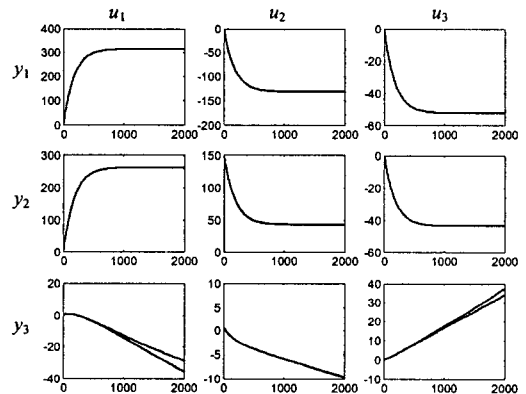


그림 4. 다양한 계단 입력의 크기에 따른 10개의 계단응답 모델
Fig. 4. Ten step-response models with various step amplitudes

계단 입력의 크기에 대한 영향을 파악하기 위하여, 미세한 크기의 계단입력을 비선형 모델 (1)~(8)에 인가하여 이에 따른 계단 응답 모델 특성을 비교하였다. 먼저, [0 1]로 정규화된 세 입력 u_1, u_2, u_3 에 각각 최대 밸브 개폐량의 1[%], 10¹[%], 10²[%],..., 10⁹[%]의 10 가지 크기의 계단 입력을 독립적으로

인가하여 얻어진 10개의 계단 응답 모델을 그림 4에 나타내었다. 그림 4에서 9개의 응답들은 각각 10개의 계단 입력에 의하여 독립적으로 얻어진 10개의 계단 응답을 포함하고 있지만, 그 차이가 거의 나타나지 않음을 알 수 있다.

이론적으로 모든 출력이 안정한 플랜트에 계단 입력의 크기를 미세하게 인가하는 경우, 그 출력은 선형화 모델의 출력과 유사하게 나타나게 된다. 하지만, 본 연구 대상인 보일러-터빈 시스템의 경우에는 세 번째 출력인 수위 y_3 가 적분 특성을 포함하고 있다. 따라서 아주 미세한 계단 입력을 인가하더라도, y_3 가 지속적으로 증가 혹은 감소하게 되어, 결국에서 선형화 영역을 벗어나게 된다. 따라서 선형화 영역을 벗어난 y_3 는 다른 출력들과의 상호작용을 통하여, 이론적인 미소신호 영역에서 선형화된 모델과는 전체적인 차이를 나타내는 것으로 파악된다.

2.4 보일러 터빈 시스템의 DMC 설계

단일 입출력 (Single Input Single Output, SISO) 시스템에서, DMC의 예측 방정식은 다음과 같은 형태이다[11].

$$Y_{k+1|k} = Y_{k+1|k-1} + S\Delta U_k + Y_{k+1|k}^d \quad (33)$$

(33)에서 $Y_{k+1|k}$ 는 $t=k$ 인 순간에서 구한 미래 출력 제적 $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 을 나타낸다. 이때 p 는 예측구간으로써, 제어에 사용되는 미래 시간 구간이다. $Y_{k+1|k-1}$ 은 이전 u_{k-1} 의 입력이 계속 인가되었을 때의 오픈루프(open loop) 출력 제적 $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 이다. ΔU_k 는 입력 벡터 $[\Delta u_k, \dots, \Delta u_{k+m-1}]$ 이고, m 은 예측에 사용되는 제어구간이다. S 는 계단 응답 계수를 포함하고 있는 동역학 행렬이고, $Y_{dk+1|k}$ 는 미래의 출력에서의 외란 값이다.

제어입력을 계산하기 위하여 매 이산시간마다 다음과 같은 최적화가 실행된다.

$$\min_{\Delta u_k} \|E_{k+1|k}\|_{\Lambda} + \|\Delta U_k\|_{\Gamma} \quad (34)$$

이 때 $E_{k+1|k}$ 는 $(Y_{k+1|k} - R_{k+1|k})$ 으로, 매 이산시간의

오차 $[e_{k+1}, \dots, e_{k+p}]$ 를 나타내며, $R_{k+1|k}$ 은 미래의 출력이 요구되는 목표값을 나타내는 벡터로서 $[r_{k+1}, \dots, r_{k+p}]$ 로 표현된다. $\|\cdot\|$ 는 가중치가 고려된 유클리디언 노름 (Weighted Euclidean norm)인 $x^T A x$ 이다.

그리고, (34)의 목적함수에 다음과 같은 입출력 제약조건들이 고려된다.

$$Y_{\min} \leq Y_{k+1|k} \leq Y_{\max} \quad (35)$$

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U_k \leq \Delta U_{\max} \quad (36)$$

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max} \quad (37)$$

이 때, U_k 는 $[u_k, \dots, u_{k+m-1}]$ 이다.

이러한 입출력의 제약조건 (35)~(37)을 갖는 최적화 문제를 해결하기 위해서는 QP(Quadratic Programming)을 사용한다.

매 이산시간에서 최적화된 입력 ΔU_k 가 계산되면, 첫 번째 입력 Δu_k 는 실제 입력으로 사용되게 되고, 그 나머지 값들은 버려진다. 이러한 절차는 다음 이산시간에도 반복적으로 되풀이된다.

본 연구에서의 보일러-터빈 시스템은 3개의 입력과 3개의 출력을 가진 다중입력 다중출력 (Multi-Input Multi-output, MIMO) 시스템이다. 그러므로 (33)~(37)의 Y 의 원소인 y , ΔU 의 원소 Δu , E 의 원소 e 그리고 R 의 원소 r 은 각각 세 개의 원소를 가진 벡터로 구성된다. 또한 동역학행렬 S 는 그림 2 또는 그림 3의 9가지 계단응답을 모두 포함하게 된다.

본 연구에서 제어기의 설계는 전형적인 DMC 설계 방식을 따랐다. 먼저 DMC의 이산 시간의 간격은 5초, 예측 구간은 600초, 그리고 제어구간은 600초로 설정하였고, 추종값 $R_{k+1|k}$ 는 3개의 목표 출력값으로 고정하였다. 그리고 (34)에서 각각의 e 와 Δu 의 3개의 입출력을 고려하여 다음과 같이 가중치를 설정하였다.

$$\|e_k\|_{\Lambda} = \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \\ e_{k3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 100 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \\ e_{k3} \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$\|\Delta u_k\|_1 = \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \\ \Delta u_{k3} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \\ \Delta u_{k3} \end{bmatrix} \quad (39)$$

이 때 e_{ik} 는 k-스텝 이산 시간에서 i번째 출력과 추종값 사이의 오차를 의미한다. (38)에서 y_3 가 y_1, y_2 에 비해 약 100배 정도 작은 값을 나타내기 때문에, 그에 맞게 정규화하기 위해 가중치 e_{k1}, e_{k2} 는 1로 설정한 반면 e_{k3} 는 100으로 정하였다.

$Y_{dk-1|k}$ 는 측정된 실제 출력값과 오픈 루프 모델의 출력의 차이를 이용하여 일정한 상수 값을 갖는 벡터로 설정하였다. 본 연구에서는 출력이 부하의 증감에 따라서 시시각각으로 변하기 때문에 (35)에 나타난 출력의 제약 조건은 고려하지 않았으며, (9)~(11)에 나타난 입력 변화량의 제약 조건은 (36)의 형태로, 입력 크기의 제약조건 $[0, 1]$ 은 (37)과 같이 표현하여 제어기에서 고려하도록 하였다.

그림 5는 시스템의 전체 구조를 보여준다. DMC 제어기는 비선형 보일러-터빈 시스템에 적용되며, 매 이산시간마다 계단응답모델을 활용하여 제약조건이 고려된 최적화를 수행한다. 계단응답모델에 따른 제어 특성을 비교하기 위해, 같은 DMC 제어기에 두 가지의 계단응답 모델을 독립적으로 적용하였다.

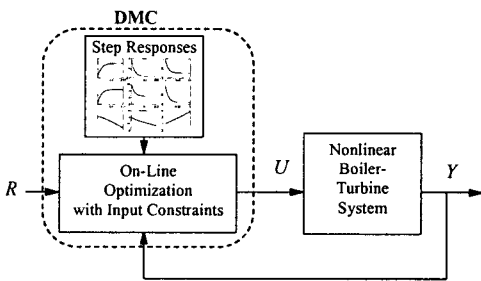


그림 5. DMC 제어 시스템 구성
Fig. 5. DMC control system configuration

3. 모의 실험 결과

본 연구에서는 개인용 컴퓨터 환경에서 Matlab을 사용하여 (1)~(8)의 비선형 모델과 DMC 제어 시스

템의 모의 실험을 수행하였다. 시스템이 초기에 $Y=(100, 50, 0)$, $X=(100, 50, 449.5)$, $U=(0.271, 0.604, 0.336)$ 인 정상상태에 있다고 가정하고, DMC의 추종값은 $(120, 100, 0)$ 으로 고정하였다. 이는, 드럼 내의 증기 압력과 전기 부하는 각각 120과 100으로 상대적으로 증가하는 반면, 드럼 내의 수위는 0으로 유지됨을 나타낸다.

그림 6~9는 그림 2와 그림 3의 두 가지 계단응답 모델을 이용한 독립적인 모의실험 결과이다. 그림 6와 8에서, 가로축은 시간 [초], 그리고 세로축은 y_1 [kg/cm²], y_2 [MW], y_3 [cm] 이다. 그림 7과 9는, 각각 그림 6와 8의 제어 입력을 나타내며, 가로축은 시간 [초], 그리고 세로축은 $[0, 1]$ 로 정규화된 제어 밸브의 위치, u_1, u_2, u_3 이다.

선형화 모델을 이용한 그림 6은, y_1 만이 120초~140초 사이에 추종값에 도달하고, y_2 와 y_3 는 진동하는 것을 보여준다. 즉 드럼 내의 증기압력을 제외한 나머지 출력의 제어 성능이 모두 좋지 않음을 알 수 있다. 이는 신뢰할 만한 대상 시스템의 수학적인 비선형 모델이 주어졌을 경우에도, 이의 선형화 모델은 드럼 타입의 보일러 터빈 시스템 DMC 제어에 있어서 적합하지 않다는 것을 보여준다.

이와 달리 실험적인 계단응답 모델을 사용한 그림 8에서는, 3개의 출력이 모두 110초 이후에 성공적으로 안정화됨을 알 수 있다. 따라서 화력 발전 보일러-터빈 시스템의 제어 문제에 DMC가 성공적으로 적용될 수 있음을 알 수 있다. 이는 실험적인 계단응답 모델이 부분적으로 플랜트의 비선형성을 포함하는 반면 선형화 모델의 경우 선형화 과정에서 비선형성이 제거되기 때문으로 해석된다.

그림 10과 11은 실험적인 모델을 사용한 DMC의 다양한 출력에 따른 제어 응답을 나타낸다. 그림 10에서 드럼 내의 수위 y_3 는 전체적으로 0으로 유지하면서, 드럼 내의 증기 압력 y_1 , 전기 부하 y_2 는 각각 400초 동안 110과 80, 120과 100, 그리고 130과 120으로 증가하는 경우를 나타내었다. y_1 과 y_2 는 50초 이내에 목표값에 수렴하며, y_3 는 100초이내에 목표값에 수렴함을 알 수 있다.

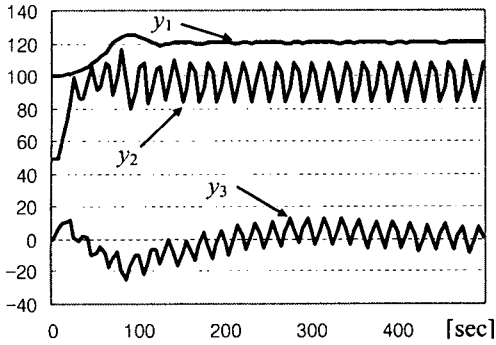


그림 6. 선형화 모델을 이용한 DMC : 출력
Fig. 6. DMC with the linearized model : Output

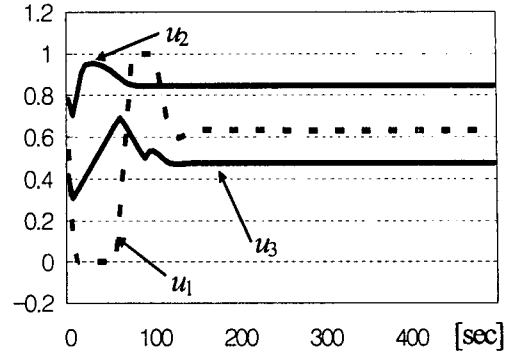


그림 9. 실험적인 모델을 이용한 DMC : 입력
Fig. 9. DMC with the process test model : Input

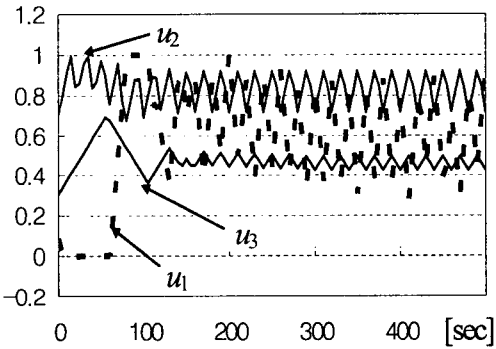


그림 7. 선형화 모델을 이용한 DMC : 입력
Fig. 7. DMC with the linearized model : Input

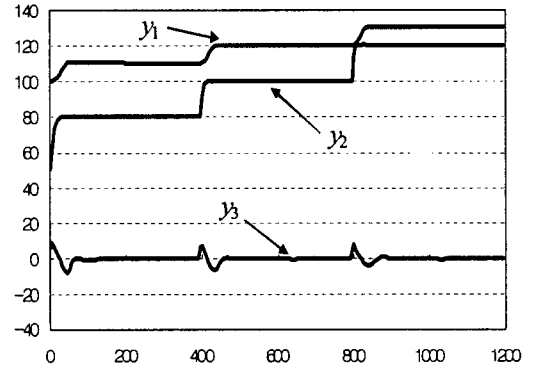


그림 10. 실험적인 모델을 이용한 DMC : 출력
Fig. 10. DMC with the process test model : Output

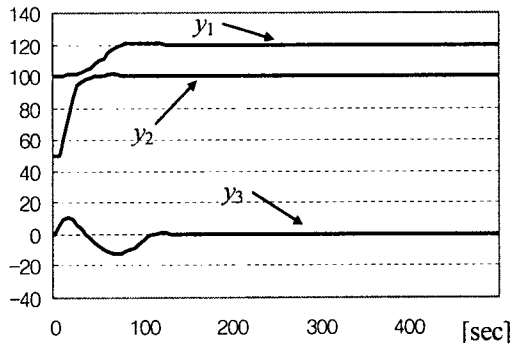


그림 8. 실험적인 모델을 이용한 DMC : 출력
Fig. 8. DMC with the process test model : Output

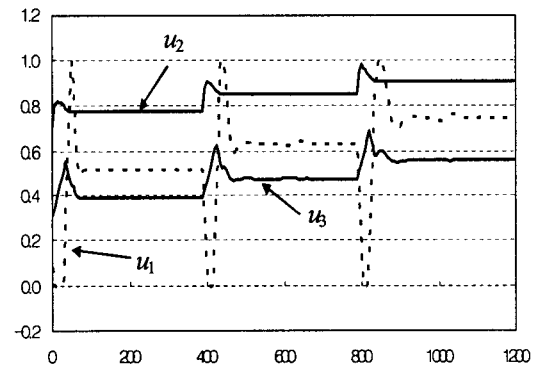


그림 11. 실험적인 모델을 이용한 DMC : 입력
Fig. 11. DMC with the process test model : Input

4. 결 론

본 논문에서는 화력 발전용 보일러 터빈 시스템의 동력학 행렬 제어 (DMC) 적용에 대한 실질적인 고려사항을 연구하였다.

일반적으로 알려져 있는 두 가지의 모델 개발 방식, 즉 선형화 모델과 실험적인 모델의 두 가지 방식에 대하여 실제 적용 가능성을 검증하였다. 먼저 개발된 두 종류의 계단응답 모델은 발전기의 증기의 양에 대한 드럼 내 수위의 반응의 묘사 (G_{32})에서 현격한 차이를 나타냄을 확인하였으며, 이는 세 번째 출력 y_3 가 적분 특성을 포함하고 있기 때문으로 판단된다. 그 후 DMC 제어의 모의실험에서는 실험적인 모델을 사용하였을 때는 만족할 만한 결과를 보여준 반면, 선형화 모델은 실제 적용에 적합하지 않다는 사실을 실험적으로 확인하였다.

본 연구를 통하여 드럼 타입의 보일러 터빈 시스템은 DMC를 사용하여 효율적으로 제어할 수 있음을 확인하였지만, 신뢰할 만한 대상 시스템의 수학적 비선형 모델이 있더라도, DMC의 설계에 사용될 계단응답 모델은 신중한 선정이 필요하다는 사실을 확인하였다.

차후 초임계압 관류식 보일러 등 다양한 보일러 모델에 적용 및 그를 바탕으로 한, 실 적용에 관한 연구를 수행할 예정이며, 본 연구의 결과는 드럼 타입의 보일러 터빈 시스템을 위한 DMC의 실제적인 적용에 유용한 지침이 될 것으로 판단된다.

본 연구는 2005년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

References

- [1] J. H. Lee, "Model Predictive Control in the Process Industries: Review, Current Status and Future Outlook", Proceedings of the 2nd Asian Control Conference, Vol II, pp. 435-438, Seoul, July 22-25, 1997.
- [2] C. R. Culter and B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm.", Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
- [3] R. D. Bell and K. J. Åström, Dynamic models for boiler-turbine-alternator units: Data logs and parameter estimation for a 160(MW) unit, Report: TRFT-3192, Lund

Institute of Technology, Sweden, 1987.

- [4] B. W. Hogg and N. M. El-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, June 1991.
- [5] R. Cori and C. Maffezzoni, "Practical Optimal Control of a drum boiler power plant", Automatica, Vol. 20, pp. 163-173, 1984.
- [6] G. Pellegrinetti and J. Bentsman, "H[∞] Controller design for boilers", Int. J. Robust Nonlinear Contr., Vol. 4, pp. 645-671, 1994.
- [7] A. Ben-Abdenour and K. Y. Lee, "A Decentralized Controller Design for a Power Plant Using Robust Local Controllers and Functional Mapping", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 11, No. 2, pp. 394-400, June 1996.
- [8] W. Tan, H. J. Marquez and T. Chen, "Multivariable Robust Controller Design for a Boiler System", IEEE Transactions on Control System Technology, Vol. 10, No. 5, pp. 735-742, Sep. 2002.
- [9] G. Prasad, E. Swidenbank and B. W. Hogg, "A Neural Net Model-based Multivariable Long-range Predictive Control Strategy Applied in Thermal Power Plant Control", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 13, No. 2, pp. 176-182, March 1991.
- [10] R. Dimeo and K. Y. Lee, "Boiler-Turbine Control System Design using a Genetic Algorithm", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 10, No. 4, pp. 752-759, December 1995.
- [11] F. A. Alturki and A. B. Abdenour, "Neuro-Fuzzy Control of a Steam Boiler-Turbine Unit", Proceedings of IEEE International Conference on Control Applications, pp. 958-962, Hawaii, U.S.A., 1999.
- [12] U.-C. Moon and K. Y. Lee, "A Boiler-Turbine System Control Using A Fuzzy Auto-Regressive Moving Average (FARMA) Model", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 18 No. 1, pp. 142-148, Mar 2003.
- [13] J. A. Rovnak and R. Corlis, "Dynamic Matrix based Control of Fossil Power Plant", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 320-326, June 1991.
- [14] L. A. Sanchez, F. G. Arroyo and R. A. Villavicencio, "Dynamic Matrix Control of Steam Temperature in Fossil Power Plant", IFAC Control of Power Plants and Power Systems, Cancun, Mexico, 1995.
- [15] G. F. Franklin, J. D. Powell and A. Emami-Naeini, Feedback Control of Dynamic System, Prentice-Hall, 2002.

◇ 저자소개 ◇

문운철 (文雲哲)

1968년 10월 1일생. 1991년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1993년 및 1996년 동 대학원 석사 및 박사. 1996~2000년 삼성SDS. 2000~2002년 우석대학교 전기공학과. 2002년~현재 중앙대학교 전자전기공학부 조교수.