

스프레이와 댐퍼를 이용한 관류 보일러 스팀 온도의 (2×2) 동역학 행렬 제어에 관한 연구

(A Study on Dynamic Matrix Control using Spray and Damper to Once-through Boiler Steam Temperature)

김우현* · 문운철

(Woo-Hun Kim · Un-Chul Moon)

요 약

동역학 행렬 제어(Dynamic Matrix Control) 기법은 각종 산업 현장에서 가장 활발하게 적용되고 있는 고급 제어 기법으로, 최근에는 공정제어의 표준 기법으로 인식되고 있다. 일반적으로 동역학 행렬 제어에 서는 대상 플랜트의 거동을 묘사하기 위하여 계단 응답 모델을 이용한다. 본 논문에서는 화력발전의 관류 보일러-터빈 시스템에 동역학 행렬 제어 기법을 적용한 결과를 제시한다. 먼저 제어를 위해 두 개의 입력 변수로 스프레이와 댐퍼를 선정한 후, 두 개의 주요 출력 변수에 대한 계단 응답 모델을 생성하였다. 그 후, 생성된 2 입력 - 2 출력 계단 응답 모델을 바탕으로 한, 동역학 행렬 제어의 최적화 계산을 통해 매 순간 보일러 스팀 온도를 제어하는 구조의 제어기를 설계하였다. 제시된 제어기를 두산(주)의 보일러 시뮬레이션 모델인 APCESS에 적용한 결과 만족할 만한 제어 성능을 나타냄을 확인하였다.

Abstract

In this paper, we present simulation results of Dynamic Matrix Control (DMC) to a Once-through boiler steam temperature. In order to control the steam temperatures, we choose spray and damper as two input variables. Then, the step response model is generated for the two major output variables by step test. After that, on-line optimization is performed using (2×2) step response model. Proposed controller is applied to the APCESS (Doosan company's boiler model simulator) and the simulation results show satisfactory performance of proposed control.

Key Words : Dynamic Matrix Control, Boiler-Turbine System, Once-through Boiler

* 주저자 : 중앙대학교 전자전기공학부 석사과정

Tel : 02-820-5333, Fax : 02-825-1584

E-mail : jeykwh@hanmail.net

접수일자 : 2009년 7월 14일

1차심사 : 2009년 7월 16일, 2차심사 : 2009년 11월 2일

심사완료 : 2009년 11월 5일

1. 서 론

보일러 스팀온도 제어는 시시각각 변하는 부하의 수
요를 충족시키면서, 열응력에 의한 터빈의 균열을 막

기 위해서 증기온도를 일정범위 내로 유지하는데 목표가 있다.

보일러는 드럼의 유무에 따라 크게 관류형(Once-through type boiler) 보일러와 드럼형(Drum type boiler) 보일러로 구분된다. 그 중 관류형 보일러는 드럼형 보일러에 비해 더 높은 압력에서의 운전이 가능하고, 열 교환 사이클 효율이 우수해 그 사용이 증가되었다. 또한 관류형 보일러는 드럼이 없어, 드럼 보일러에 비해 냉각수 수용용량이 작고, 빠른 속도의 출력 응답을 갖는 장점이 있다. 하지만, 관류형 보일러의 경우 급수제어, 온도제어, 출력제어 등이 모두 밀접한 관계를 가지고 있으므로, 제어계통이 복잡하다는 단점이 있다[1].

기존의 산업현장에서는 구조가 간단하고, 안정된 제어 성능을 유지할 수 있으며, 현장 엔지니어들에게 익숙하다는 이유로 Proportional-Integral-Derivative (PID) 제어가 가장 널리 사용되었다. 그러나 다변수 시스템인 경우 단순한 PID 제어 구조만으로는 만족할 만한 제어를 설계하기가 쉽지 않은 실정이다[2-3].

이를 극복하기 위하여 여러 종류의 적응제어(Adaptive Control) 기법 및 인공 지능 기법이 연구되어 왔다. 멀티-모델을 기반으로 하는 적응제어기법[4], PID계수를 신경 회로망 기법으로 조절하는 적응제어기법[5], 근사화된 선형 시스템으로부터 최적해를 구하기 위해 반복적 방법을 이용한 최적제어기법[6], 동역학 모델링 기법을 사용한 증기온도 제어기법[7], 퍼지 제어기법을 이용한 과열기 시스템의 증기온도 제어에 관한 연구가 발표되었다[8].

모델 예측 제어 (Model Predictive Control, MPC)는 일정한 미래 구간 내에서 예측된 출력을 바탕으로 하여, 순차적으로 제어 입력을 계산하는 제어 알고리즘을 통칭한다[9]. 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[9-12].

이 중 동역학 행렬 제어(Dynamic Matrix Control, DMC) 알고리즘은 가장 널리 알려져 있는 MPC 알고리즘 중에 한 종류로서, 제어하고자 하는 시스템의 계단 응답 모델(Step Response Model, SRM)을 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[9-12].

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

본 논문에서는 관류보일러 형태의 1,000[MW]의 초초임계압(Ultra Super Critical) 보일러-터빈 시스템에 DMC 기법을 적용하여 보일러 스팀 온도를 제어한 결과를 제시한다. 먼저, 제어를 하기 위해 대상 시스템에서 스프레이와 댐퍼를 2개의 입력변수로 선정한 후, 각각의 입력 변수들의 계단 입력 실험을 통해서 SRM을 생성하였다. 다음으로는 생성된 SRM을 바탕으로 해서, 매 순간 DMC의 최적화 계산을 통해 보일러 스팀온도를 제어하는 제어기를 설계하였다. 이 때 제시된 제어기를 두산(주)의 보일러 모델 시뮬레이터인 APESS에 적용한 결과 만족할 만한 성능을 확인하였다.

2. DMC의 적용

2.1 DMC 알고리즘

DMC에서는 제어 대상의 미분방정식을 대신해 미리 측정된 계단응답모델을 이용하여 시스템의 거동(Dynamics)을 표현한다. 단일 입출력(Single Input Single Output, SISO)시스템에서, 예측 방정식은 -

DMC가 사용하는 플랜트 모델 - 다음과 같은 형태이다[15].

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

(1)에서, $Y_{k+1|k}$ 는 $t=k$ 인 순간에서 제어변수 예측구간(Output Horizon) p 를 갖는 미래 출력의 궤적 $[y_{k+1|k}, \dots, y_{k+p|k}]$ 을 나타내는데, 아래 첨자는 $t=k$ 인 순간에 계산된 Y_{k+1} 이라는 의미이다. 그림 1에 p 를 나타내었으며, 제어에 이용될 향후 출력의 시간 구간을 나타낸다.

$Y_{k+1|k-1}$ 은 u_{k-1} 에서의 입력이 계속 인가되었을 때의 오픈루프(open loop) 출력 궤적 $[y_{k+1|k-1}, \dots, y_{k+p|k-1}]$ 이며, 이는 $t=k-1$ 인 순간에 계산된 Y_{k+1} 을 나타낸다. ΔU_k 는 입력 벡터 $[\Delta u_k, \dots, \Delta u_{k+m-1}]$ 이고, m 은 조절변수 예측구간(Input Horizon)으로써, 제어에 이용될 향후 입력의 시간 구간을 나타낸다. S 는 계단 응답 계수를 포함하고 있는 $p \times m$ 동역학 행렬이고, $Y_{k+1|k}^d$ 는 $t=k$ 인 순간에 추정된 미래의 외란값이다.

결국, (1)은 미래의 플랜트 출력을 (입력이 고정되었을 경우의 미래 플랜트 출력) + (미래 입력 변화의 영향) + (미래 외란의 영향)으로 나타낸 형태이다. 따라서 (1)을 통하여 미래 입력에 따른 출력의 변화를 예측하게 된다.

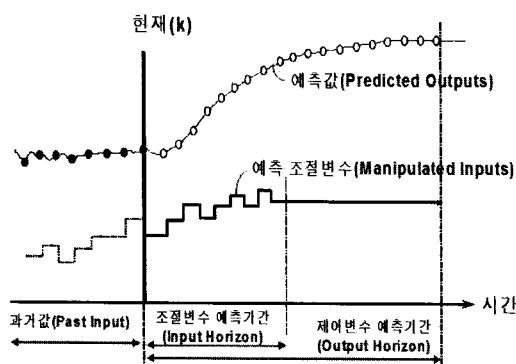


그림 1. 모델 예측 제어
Fig. 1. Model Predictive Control

DMC는 SRM을 이용하여 출력을 예측한 후, 이를 이용하여 성능지표를 최적화하는 입력을 구하게 된다.

일반적인 최적제어가 플랜트 모델로 미분 방정식을 사용하는 것과는 달리, DMC의 경우에는 실험적으로 생성한 SRM을 사용함으로써 일반적인 최적제어와 차이점을 가지게 된다.

제어입력을 계산하기 위하여 매 이산시간마다 다음과 같은 최적화가 실행된다.

$$\min_{\Delta U_k} \|E_{k+1|k}\| + \|\Delta U_k\| \quad (2)$$

이 때, $E_{k+1|k}$ 는 $(Y_{k+1|k} - R_{k+1|k})$ 로, 매 이산시간의 오차 $[e_{k+1}, \dots, e_{k+p}]$ 를 나타내며, $R_{k+1|k}$ 는 미래 출력의 목표값을 나타내는 벡터로서 $[r_{k+1}, \dots, r_{k+p}]$ 로 표현된다. $\|E_{k+1|k}\|$ 와 $\|\Delta U_k\|$ 는 가중치가 고려된 유클리디언 노름 (Weighted Euclidean norm)이다.

그리고, (2)의 목적함수에 다음과 같은 제약조건들이 고려된다.

$$Y_{\min} \leq Y_{k+1|k} \leq Y_{\max} \quad (3)$$

$$\Delta U_{\min} \leq \Delta U_k \leq \Delta U_{\max} \quad (4)$$

$$U_{\min} \leq U_k \leq U_{\max} \quad (5)$$

이러한 입출력의 제약조건 (3)-(5)를 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 2개의 입력과 2개의 출력을 가진 다중입력 다중출력(Multi-Input Multi-output, MIMO) 시스템으로 묘사된다. 그러므로 (1)-(5)의 $Y_{k+1|k}$, $Y_{k+1|k-1}$, $Y_{k+1|k}^d$, $R_{k+1|k}$, $E_{k+1|k}$ 는 각각 $2p \times 1$ 벡터, 그리고 ΔU_k 는 $2m \times 1$ 벡터로 확장된다. 또한, 동역학 행렬 S 는 4개의 계단 응답을 포함하는 $2p \times 2m$ 동역학 행렬로 확장된다. 또한 (3)의 제약조건은 $2p \times 1$, (4)와 (5)의 제약조건은

2m×1으로 확장되어 고려된다.

2.2 제어 모델과 시뮬레이터

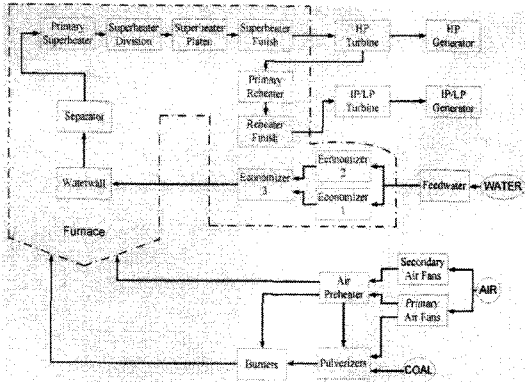


그림 2. 1,000(MW) 초초임계압 보일러 플랜트
Fig. 2. 1,000(MW) Ultra Super Critical Boiler Plant

본 연구의 제어 대상 플랜트인 1,000[MW]의 초초임계압(Ultra Super Critical) 보일러-터빈 시스템의 전체 구조도를 그림 2에 나타내었으며, 본 연구에서는 두산(주)의 보일러 모델 시뮬레이션 S/W인 APCESS를 사용하여 대상 시스템을 재현하였다.

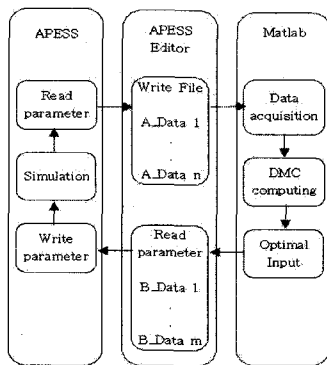
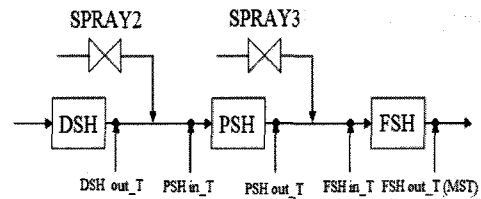


그림 3. 시뮬레이터와 제어기의 자료 처리
Fig. 3. Data process of Simulator and Controller

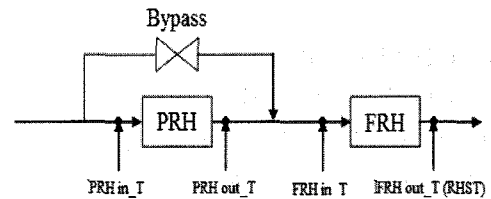
APCESS 프로그램은 보일러 시스템이 실제 동작하는 것과 같은 시뮬레이션을 구현하며, 각 수치값을 실시간으로 출력한다. 또한 Matlab과의 인터페이스를 위해 APCESS Editor 프로그램을 사용하여 제어에 필

요한 수치들을 실시간으로 파일에 저장하게 된다. 그러면 Matlab으로 프로그램한 제어기는 파일로부터 그 수치를 입력받아 DMC를 수행하고, 설정된 제어온도로 제어하기 위한 최적의 입력값들을 다시 APCESS Editor를 통해 APCESS에 전달하게 된다. APCESS는 이 입력을 바탕으로 다시 시뮬레이션을 실행한다. 이와 같은 과정을 그림 3에 나타내었다.



DSH=Division Superheater PSH=Platen Superheater
FSH=Final Superheater
out_T=outlet temperature in_T=inlet temperature

그림 4. 과열기의 구조
Fig. 4. Structure of Superheater



PRH=Primary Reheater FRH=Finish Reheater

그림 5. 재열기의 구조
Fig. 5. Structure of Reheater

2.3 DMC 제어기의 설계

그림 4와 5에 각각 관류보일러의 과열기(Super Heater, SH)와 재열기(Reheater, RH)의 구조를 나타내었다. 관류보일러의 주요 출력변수는 과열기의 스팀온도(그림 4의 MST)와 재열기의 스팀온도(그림 5의 RHST)이다. 이 출력 변수에 영향을 미치는 변수는 SPRAY2, SPRAY3, Bypass, Damper 등이 있으나, 그 중 큰 영향을 주는 입력 변수 2가지를 SPRAY3와 재열기의 Damper로 각각 선정하였다.

APCESS 시뮬레이터를 사용하여, SPRAY3(u_1)와

Damper(u_2)에 대한 MST(y_1)와 RHST(y_2)의 계단 응답을 구하고, 이를 그림 6에 나타내었다.

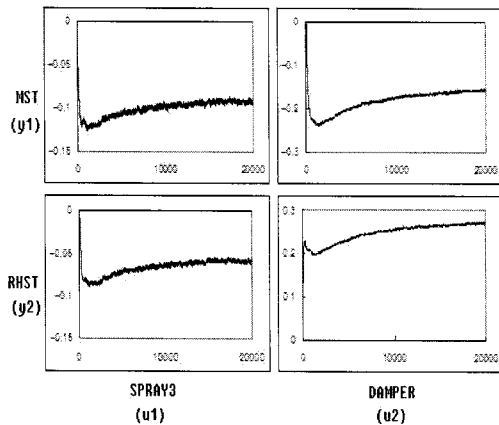


그림 6. 계단 응답 모델
Fig. 6. Step response models

3. 모의 실험 결과

본 연구에서의 제어기 설계는 전형적인 DMC 설계 방식을 따랐다. 먼저, DMC의 이산 시간의 간격은 5초, 예측 구간은 6,000초, 그리고 제어구간은 100초로 설정하고, 추종값을 MST는 613[°C] RHST는 624[°C]로 설정하였다.

그리고 (2)에서의 가중치를 반복적인 제어기 실험을 통해 다음과 같이 설정하였다.

$$\| e_k \| = \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 1000000 & 0 \\ 0 & 50000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_{k1} \\ e_{k2} \end{bmatrix} \quad (6)$$

$$\| \Delta u_k \| = \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \end{bmatrix}^T \begin{bmatrix} 10000 & 0 \\ 0 & 50000 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta u_{k1} \\ \Delta u_{k2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

이 때, e_{ki} 는 k-스텝 이산 시간에서 i번째 출력과 추종값 사이의 오차, Δu_{ki} 는 k-스텝 이산 시간에서 i번째 입력의 변화량 나타내며, Δu_{k1} SPRAY3의 변화량을 Δu_{k2} 는 DAMPER의 변화량을 의미한다. 또한 식 (6)의 1,000,000과 50,000의 경우, e_{k1} 과 e_{k2} 의 가중치의 비가 2 : 1이므로 e_{k1} 을 e_{k2} 보다 2배 정도 더 고려하여 제어하게 된다. 즉, MST를 RHST보다 2배 중요하게

제어하게 된다. 마찬가지로, 식 (7)의 1,000과 50,000의 경우에는, Δu_{k2} 가 Δu_{k1} 보다 5배 정도 억제된다. 따라서 SPRAY3의 변화량이 DAMPER의 변화량 보다 5배 더 크게 움직이게 된다.

그림 7은 시스템의 전체 구조를 보여준다. DMC 제어기는 APSS 보일러 모델 시뮬레이터에 적용되며, 매 이산시간마다 SRM을 활용하여 제약조건이 고려된 최적화를 수행한다.

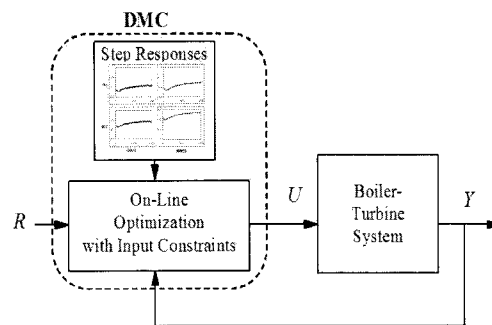


그림 7. DMC 제어 시스템 구성
Fig. 7. DMC-control system configuration.

제어성능 평가를 위하여 그림 8과 같은 전력부하의 변화를 가정하였다. 즉 출력이 900[MW]인 정상상태에서 1,000초가 지났을 때, 출력을 775[MW]로 감소시키는 상황을 가정하였다.

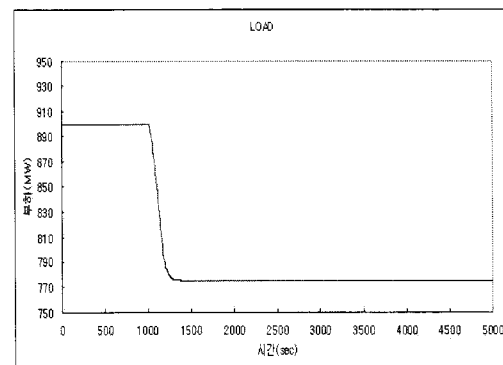


그림 8. 부하의 변화
Fig. 8. Change of load

그림 9~10은 부하가 변화할 때 제시된 DMC 기법을 통한 스팀온도 제어의 성능을 나타낸 것이다. 과열

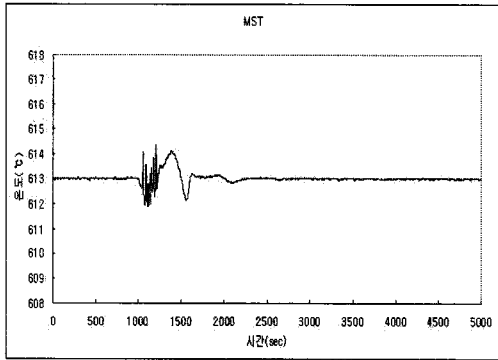


그림 9. 과열기 스팀온도
Fig. 9. Superheater steam temperature

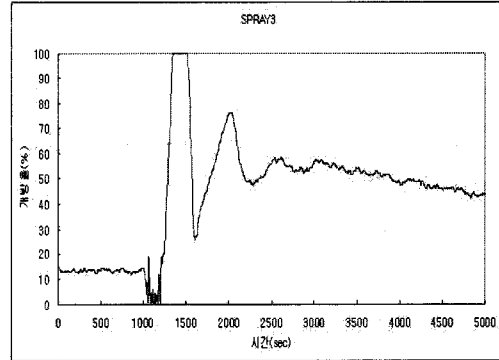


그림 11. SPRAY3의 입력
Fig. 11. Input of Spray3

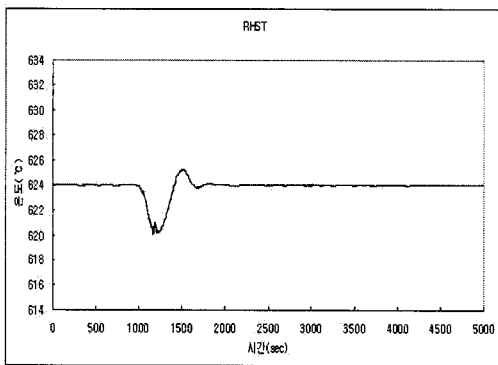


그림 10. 재열기 스팀온도
Fig. 10. Reheater steam temperature

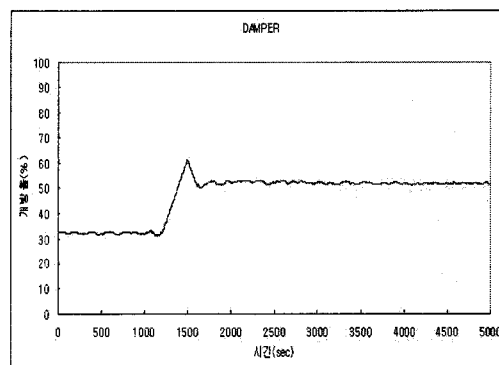


그림 12. 댐퍼의 변화
Fig. 12. Change of Damper

기의 스팀온도는 1도 이내를 유지하며, 재열기의 스팀 온도는 5도 이내를 유지함을 알 수 있다. 그림 11-12 는 이때 입력의 변화를 나타낸다.

4. 결 론

본 논문에서는 보일러의 스팀온도 제어를 위해 DMC 기법을 적용한 2 입력-2 출력 제어를 설계하였다. 입력 변수들의 계단응답모델을 바탕으로 하여, 매 순간 DMC 기법을 사용하여 최적화된 입력값을 업데이트해 제어를 하도록 구성하였다. 스팀 온도를 제어하는 입력 요소를 2가지로 제한했음에도 불구하고, 시뮬레이션 결과로부터 원하는 제어성능을 얻을 수 있었다.

향후 연구로는, 보일러 시스템의 다양한 입출력을

고려한 확장된 형태의 DMC 제어에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

본 연구는 2009년도 중앙대학교 학술연구비(일반연구비) 지원에 의한 것임.

References

- [1] J. Adams, D. R. Clark, J. R. Louis and J. P. Sparbauer, "Mathematical Modeling of Once-Through Boiler Dynamics", IEEE Trans. on power apparatus and systems, Vol. 84, pp. 145-156, Feb. 1965.
- [2] P. J. Gawthrop and P. E. Nomikos, "Automatic tuning of commercial PID controllers for single loop and multiloop applications", IEEE Control Systems Magazine, pp. 34-42, 1990.
- [3] D. E. Seborg, "A perspective on advanced strategies for process control", Modelling Identification and Control, Vol.

- 15, No. 3, pp.179-189, 1994.
- [4] Wen-Jie Zhao, Yug-Uang Niu and Ji-Zhen Liu, "Multi-model adaptive control for the superheated steam temperature", Machine Learning and Cybernetics, Vol. 1, 4-5, pp. 269-272, Nov. 2002.
- [5] Jianhua Zhang, Guolian Hou and Jinfang Zhang, "Adaptive Neuro-control System for Superheated Steam Temperature of Power Plant over Wide Range Operation" Intelligent Systems Design and Applications, Vol. 1, 16-18 pp. 138-141 Oct. 2006.
- [6] S. H. Lee and J. S. Kim, "A Temperature Control of Thermal Power Plant Superheater System using Iterative Method", Journal of the Korean institute of illuminating and Electrical installation Engineers, Vol. 13, No. 4, pp. 47-55, 1999.
- [7] Gough, B, Advanced Control of Steam Superheat Temperature on a Utility Boiler, Universal Dynamics Technologies Inc., Richmond, Canada, 2000.
- [8] D. G. Lee, S. H. Lee, J. S. Kim and S. W. Ryu, "Fuzzy Controller Design for Steam Temperature Control of Power Plant Superheater", Journal of the Korean institute of illuminating and Electrical installation Engineers, Vol. 16, No. 6, pp. 80-86, November 2002.
- [9] 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.
- [10] C. R. Culter and B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm.", Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
- [11] 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: TFRT-3192, Lund Institute of Technology, Sweden. 1987.
- [12] P. D. Roberts, "A Brief Overview of Model Predictive Control", Model Predictive Control: Techniques and Applications, 1999.
- [13] B. W. Hogg and N. M. El-Rabaie, "Multivariable Generalized Predictive Control of a Boiler System", IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. 6, No. 2, pp. 282-288, 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] F. A. Alturki and A. B. Abdennour, "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.

◇ 저자소개 ◇

김우현 (金佑憲)

1984년 1월 22일생. 2009년 중앙대학교 전자전기공학부 졸업. 현재 중앙대학교 전자전기공학부 대학원 석사과정

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 부교수.