

유리 용해로 온도 제어를 위한 DMC 기법의 적용 사례

문운철  
우석대학교 전기공학과

An Application of DMC For Temperature Control Of A Glass Melting Furnace

Un-Chul Moon  
Electrical Engineering Department of Woosuk Univ.

**Abstract** - 본 논문에서는 유리 용해로의 온도 제어를 위한 동역학 행렬 제어 (Dynamic Matrix Control, DMC) 기법의 적용 사례를 소개한다. 다양한 제약조건들과 긴 시간지연 응답을 갖는 유리 용해로는 DMC의 좋은 적용 분야가 될 수 있다. 먼저 용해로 테스트를 통하여 입출력 데이터를 생성하고 이를 바탕으로 용해로의 동역학 행렬 모델을 결정한다. 그 후, 모의 실험을 통하여 제어기의 설계변수들을 결정한다. 마지막으로, 제시된 제어기를 실제 용해로 생산 공정에 적용된 결과를 제시한다.

다. 마지막으로, 제시된 제어기를 용해로 삼성코닝(주)의 생산 공정에 적용된 결과를 제시한다.

2. 유리 용해로

유리 용해로는 원 재료를 용융하여 유리 물 형태로 만든 후, 이를 성형 공정에서 성형할 수 있도록 하는 역할을 하기 때문에 최종적인 제품의 품질 및 불량률에 직접적인 영향을 미치게 된다. 이때, 유리 용해로의 온도 제어는 용융에 사용되는 열에너지를 조절하여 원재료를 유리물(Molten glass)로 용융시킨 후, 이를 적절히 냉각하여 유리물의 온도를 일정하게 유지하는 역할을 하게 된다.

1. 서 론

동역학 행렬 제어 (Dynamic Matrix Control, DMC) 는 모델 예측 제어 (Model Predictive Control, MPC)의 한 종류로서 역사적인 관점에서 보면 MPC의 모체가 된 제어 기법이다 [1]. MPC는 주어진 미래의 일정한 제어 범위(Control Horizon)동안 플랜트의 예상 출력을 바탕으로 제어입력을 실시간으로 계산하는 제어기법을 일컫는다. 이 때, DMC는 플랜트의 출력을 예상하기 위한 모델로서 플랜트의 계단 응답 모델을 사용한다 [2]. 이는 1970년대에 미국의 쉘-정유사의 엔지니어들이 정유 플랜트의 자동제어를 위하여 처음 개발한 기법으로, 여러 가지의 다양한 플랜트에 대하여 다양한 응용 가능성을 제시하였다. DMC는 실제 제어문제에 등장하는 시간지연 응답과 다양한 제약조건 등을 극복할 수 있는 제어 기법으로서, 화학, 식음료, 제지 등의 다양한 공정에 성공적으로 실 적용되었다 [2],[3]. 이러한 DMC는 각각의 적용 대상에 적합하도록, 플랜트의 표현 모델 혹은 제어입력 계산 방법 등이 적절히 변형되었고, 이들은 MPC라는 제어 기법으로 통합되어 불리게 되었다. Lee등은 이러한 제어기법들을 상태변수공간에서 해석하고, 플랜트의 상태변수 예측을 통한 MPC 기법을 제시하였다 [4]. 상태공간 모델을 이용한 MPC는 LQG (Linear Quadratic Gaussian)와 유사하지만, LQG가 무한 제어범위동안의 목적 함수를 최적화하는 상태변수 회귀 방법임에 반해, 상태공간 MPC는 유한 제어범위에서 실시간 계산을 통하여 제어입력을 계산하기 때문에 다양한 제약조건들을 고려할 수 있다는 장점이 있다. 손덕현과 이창구는 증기 발생기의 수위제어를 위한 MPC를 설계하였다 [5]. 그들은 상태공간 모델을 이용하여 플랜트의 출력을 예측하였으며, 기존의 PI제어기와 비교를 통하여 저출력일 경우 MPC가 우수한 성능을 나타내는 모의실험 결과를 제시하였다.

본 논문에서는 DMC를 유리 용해로의 온도제어에 적용한 결과를 제시한다. 다양한 제약조건들과 긴 시간지연 응답을 갖는 유리 용해로는 DMC의 좋은 적용 분야가 될 수 있다. 먼저 용해로 테스트를 통하여 입출력 데이터를 생성하고 이를 바탕으로 용해로의 모델인 동역학 행렬 (Dynamic Matrix)을 구한다. 그 후, 유리 용해로의 특성에 부합하도록 제어 평가 함수 및 제약 조건을 설정한

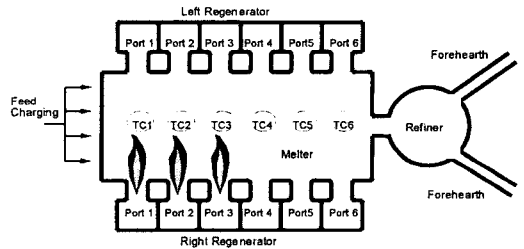


그림 1. 유리 용해로 상단면도.

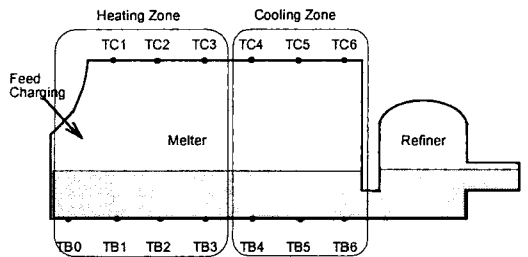


그림 2. 유리용해로의 중단면도.

그림 1과 2는 전형적인 유리 용해로의 구조로서 각각 상단면도 및 중단면도이다. 유리 용해로는 크게 두개의 독립된 공간, 즉, 멜터 (Melter)와 청징조 (Refiner)로 구성되어 있고, 멜터의 좌우에는 축열실(Regenerator)이 설치되어 있는 구조이다. 3차원적으로, 멜터와 축열실은 직육면체의 구조이고 청징조는 원기둥 형태의 구조이다. 전형적인 멜터의 크기는 높이, 너비, 길이가 각각 5, 10, 40 m 정도이다. 좌우의 축열실은 각각 6개의 포트(Port)를 포함하고 있으며, 각 포트는 용융에 필요한 연소 불꽃과 연소공기, 혹은 용융된 유리물을 적절한 온도로 식히기 위한 냉각공기를 제공한다. 그림 1에서 유리 용해로는 완전한 좌우대칭형 구조물임을 알 수 있다.

유리의 원료는 일정수분을 포함한 가루상태로 피스톤 또는 스크류 타입으로 공급되며, 그림 1, 2에서 멜터의 왼쪽에 나타내었다. 공급된 원료는 좌우의 포트들에서 bunker-씨(BC, Bunker-C) 오일을 멜터 내부에서 연소시켜, 복사 에너지의 형태로 가열함으로써 유리로 화학변화를 일으키게 된다.

그림 1에서, 좌우 축열실의 포트 1, 2, 3에는 각각 연료인 BC오일을 연소시키는 버너(Burner)와 연소공기(Combustion Air)의 공급과 배출을 위한 통로들이 있다. 연소에 필요한 산소공급을 위한 연소공기는 연소되는 BC오일의 양에 따라 미리 정해진 비율대로 조절된다. 연소 불꽃과 연소 공기의 방향은 20분 주기로 바뀌게 된다. 즉, 한쪽 축열실의 포트 1, 2, 3에서 각각 연소 공기와 불꽃을 공급하는 동안, 다른 쪽에서는 연소 가스를 방출하는 역할을 하게 되고, 20분 후에는 그 역할을 바꾸게 되는데 이를 리버싱(Reversing)이라 한다. 높은 온도의 연소 가스는 반대편의 축열실을 통해 배출되는 동안 지그재그 형태로 쌓여있는 벽돌들을 통과하게 되고 이 과정에서 열 에너지를 축열실 내부에 저장하게 된다. 따라서, 리버싱을 통하여 방출되는 연소 가스의 열에너지는 축열실에 의해서 재활용되게 된다.

또한, 그림 1의 포트 4, 5, 6은 용융된 유리물을 적절한 온도로 식히기 위한 냉각 공기(CA, Cooling Air)를 공급한다. 냉각공기의 유량은 공급 공기 압력의 제어시스템과 함께 뎀퍼를 조절하도록 구성되어 있다. 포트 1, 2, 3가 미리 예열된 연소공기를 이용하여 연소열을 공급하는 반면에 포트 4, 5, 6은 예열되지 않은 자연상태의 대기를 리버싱하지않고 좌우에서 연속적으로 공급하게 된다. 실제 용해로 온도제어시에는 포트 4와 5의 CA는 항상 고정된 양을 공급하고, 포트 6의 CA양은 용해로의 온도에 적합하도록 조절하게 된다.

이와 같은 이유로 그림 2에서와 같이 멜터의 포트 1, 2, 3 부분은 가열지역(Heating Zone), 포트 4, 5, 6 부분은 냉각 지역(Cooling Zone)이라고 불리운다.

용해로 내부의 열적인 상태를 측정하기 위하여, 여러 개의 온도 센서들이 멜터의 바닥과 천정에 설치되어 있다. 천정 온도 센서(Crown thermocouple)는 멜터 내부의 최상부에 설치되어 멜터 내부의 공기 온도와 방사 에너지를 측정하는 역할을 하고, 바닥 온도 센서(Bottom thermocouple)는 멜터의 바닥에 설치되어 용융된 유리물의 온도를 측정하게 된다. 그림 1과 2는 이러한 온도 센서들의 위치를 나타낸다. 그림들에서 천정 온도 센서와 바닥 온도 센서는 각각 TC (Temperature Crown)와 TB (Temperature Bottom)로 나타내져 있다.

### 3. 제어기 설계

#### 3.1 DMC 제어기

DMC는 대상시스템의 계단응답 모델을 구한 후, 다음과 같은 출력예측을 통하여 제어입력을 결정하게 된다.

$$y_{k+1/k} = Y_{k+1/k-1} + S\Delta u_k + Y^d_{k+1/k} \quad (1)$$

이때,  $y_{k+1/k}$ 은  $t = k$ 에서 구한 미래의 출력 시퀀스(Trajectory)  $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 이며,  $Y_{k+1/k-1}$ 은 제어입력을 전 스텝의 제어입력  $u_{k-1}$ 로 유지한다고 가정했을 경우의 출력 시퀀스  $[y_{k+1}, \dots, y_{k+p}]$ 이다. (1)은 시스템의 계단응답모델을 이용하여 매 시간마다 반복적으로 계산하게 된다.

즉,  $Y_{k+1/k-1}$ 은 전 스텝의 제어입력을 계속 유지하며, 외란도 없을 경우의 미래 예상출력이다.  $\Delta u_k$ 는 현재와 미래 스텝에서의 제어입력 변화분  $[\Delta u_k, \dots, \Delta u_{k+m-1}]$ 이며, S는 동역학행렬이라고 부르는 계단응답모형의 상수들이다. p는

예측구간(Prediction Horizon)이며, p보다 작거나 같은 값으로 선택되는 m은 제어구간(Control Horizon)이다.  $Y^d_{k+1/k}$ 는 미래의 출력에 영향을 미치는 외란이며, 이는 주로 실제 측정 출력( $y_k$ )과 오픈루프 모델출력( $Y_{k+1/k}$ 의 첫번째 항)과의 차이로 정의된다.

제어입력을 계산하기 위하여 다음과 같은 평가함수가 사용된다.

$$\min_{\Delta u} \|y_{k+1/k} - R_{k+1/k}\|_k + \|\Delta u_k\| \quad (2)$$

$R_{k+1/k}$ 는 출력  $y_{k+1}, \dots, y_{k+p}$ 의 목표값을 나타내는 벡터이고,  $\|x\|_k$ 는 가중치가 고려된 유클리디언 노름(Weighted Euclidean norm)인  $x^T Ax$ 이다. 또한 다음과 같은 제약조건들이 고려된다.

$$y_{\min} \leq y_{k+1/k} \leq y_{\max} \quad (3)$$

$$\Delta u_{\min} \leq \Delta u_k \leq \Delta u_{\max} \quad (4)$$

$$u_{\min} \leq u_k \leq u_{\max} \quad (5)$$

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

DMC의 기본적인 구조는 (1)-(5)와 같다.  $R_{k+1/k}$ 를 결정하기 위하여 참조 시퀀스(Reference Trajectory)가 사용되기도 하며, p, m, A, Γ와 같은 변수들이 제어기의 설계변수로 사용된다. 또한, 어떤 종류의 DMC에서는 (2)에서 1-norm 혹은 ∞-norm을 사용하여 목적함수를 구하는 문제를 LP (Linear Programming)문제로 정형화기도 한다.

#### 3.2 용해로 적용

용해로 온도 제어를 위해 다음과 같이 입출력 변수를 선정하였다.

출력: TC2, TB2, TC6, TB6

입력: Port1 BC, Port 2 BC, Port 3 BC, Port 6 CA

따라서 4 입력-4 출력시스템으로 구조를 결정하였다.

이와 같이 구조를 결정한 다음, 플랜트의 입력에 각각 계단입력을 가하여 그 응답을 측정하고 이를 바탕으로 하여 시스템의 계단응답 모델을 구하였다. 그림 3, 4, 5, 6은 각각 BC1, BC2, BC3, CA6에 계단응답을 가한후 측정된 출력들의 응답이며, 그림 7는 구해진 용해로의 계단응답 모델을 나타낸다.

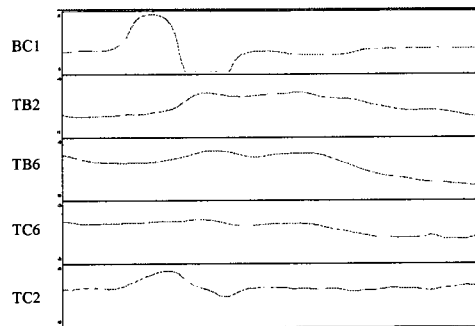


그림 3. BC1의 계단응답 출력

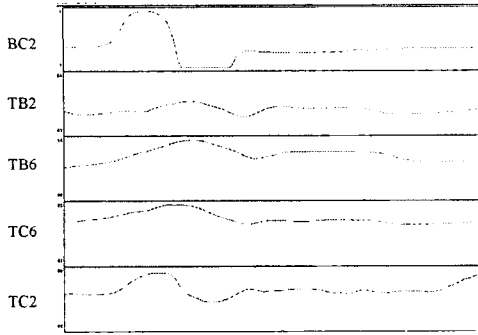


그림 4. BC2의 계단응답 출력

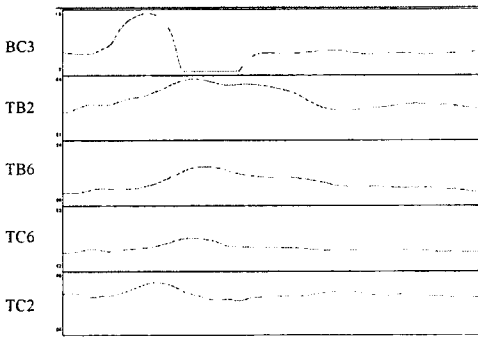


그림 5. BC3의 계단응답 출력

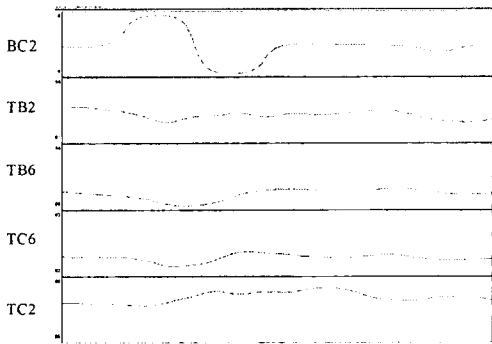


그림 6. CA6의 계단응답 출력

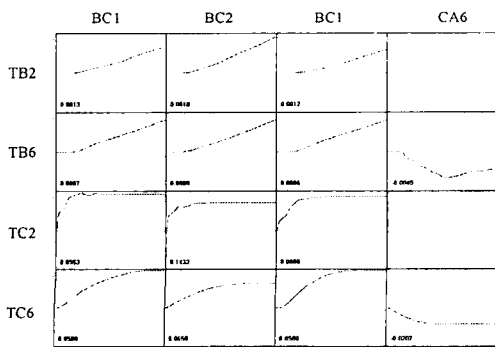


그림 7. 용해로의 계단응답 모델

이와 같이 결정된 모델을 바탕으로 제어를 설계하였다. 설계변수인  $p, m, \lambda, \Gamma$  는 모델을 바탕으로 한 다양한 시뮬레이션을 통하여 결정하였다.

#### 4. 적용 결과

제시된 복합형 제어기는 실제 TV 브라운관 유리 생산 공정에 적용되었다. 그림 8은 1주일 동안 자동운전하였을 경우의 MC2 온도 변화를 보여준다. 평소 수동운전시 바닥온도 MB2의 허용치가  $\pm 5^\circ\text{C}$ 임을 고려할 때 성공적으로 적용된 결과를 나타낸다.

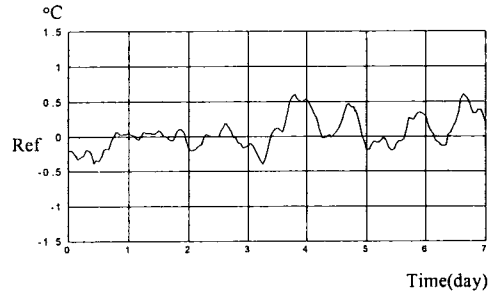


Fig. 8. 제시된 DMC의 바닥 온도 변화.

#### 5. 결 론

본 논문에서는 DMC제어기를 유리 용해로의 온도 제어에 적용한 결과를 소개 하였다. 다양한 제약조건들과 긴 시간지연을 갖는 유리 용해로는 DMC의 좋은 적용분야가 될 수 있다. 먼저 용해로 테스트를 통하여 입출력 데이터를 생성하고 이를 바탕으로 용해로의 모델인 동역학 행렬 (Dynamic Matrix)을 구한다. 그 후, 모의실험을 통하여 제어기의 설계변수들을 구하였다. 제시된 제어기는 용해로 삼성코닝(주)의 생산 공정에 성공적으로 적용되었다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] C. R. Culter and B. L. Ramaker, "Dynamic Matrix Control - A Computer Control Algorithm.", Proceedings of Joint Automatic Control Conference, San Francisco, CA, 1980.
- [2] Jay 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.
- [3] J. Richalet, A. Rault, J. L. Testud and J. Papon, "Model Predictive Heuristic Control: Applications to Industrial process", Automatica, 14(5):413-428, 1978.
- [4] J. H. Lee, M. Morari and C. E. Garcia, "State Space Interpretation of Model Predictive Control", Automatica, 30, pp. 707-717, 1994.
- [5] 손덕현, 이창구, "증기발생기 수위제어를 위한 모델예측제어기의 설계", 대한전기학회 논문지, Vol. 50D, No. 8, 2001년 8월.