

유리 용해로를 위한 고전 고급제어의 적용

문운철
삼성SDS 제조개발팀

Application of a Conventional Advanced Control for a Glass Furnace

Un-Chul Moon
SAMSUNG SDS, Manufacturing Development Team

Abstract - 본 논문에서는 TV 브라운관 유리용해로의 온도 제어를 위한 고전 고급 제어 (Conventional Advanced Control) 알고리즘을 제시한다. 용해로의 특성에 맞도록 중요한 입출력 변수를 선정한 후, 공정 실험을 통하여 얻어진 데이터를 바탕으로 입출력 변수들간의 초보적인 FOPDT (First Order Plus Dead Time) 모델들의 조합으로 용해로를 모델링하였다. 수립된 모델을 바탕으로 주요 입출력을 PI (Proportional - Integral) 형태의 cascade 및 단일 계환 루프(Single feedback loop)들의 조합으로 제어기를 구성하였다. 제시된 알고리즘은 기존 용해로에 설치되어 있는 DCS를 이용하여 구현되었고, 일 150톤 생산 규모의 용해로에 성공적으로 실적용되었다.

1. 서 론

현대 제어 이론의 눈부신 발전에도 불구하고, PID (Proportional Integral Derivative), Cascade, Override, Selective, Feedforward, Decoupler 등을 포함하는 고전고급 제어(Conventional advanced control) 기술은 공정 산업계에서 가장 널리 사용되고 있는 제어 방식이다 [1]-[3].

본 논문에서는 고전고급제어 기술을 이용하여 TV 브라운관용 유리용해로 공정의 온도제어에 적용한 사례를 제시한다. 원재료를 안정적으로 용해하여 유리로 만드는 유리 용해 공정에서는 제품의 불량률을 줄이기 위한 안정적인 온도 제어가 필수적이다. 적절하지 못한 용해로의 온도 제어는 용해된 유리물(Molten glass) 내부에 기포 혹은 불순물을 포함하여 완제품 불량률의 원인이 될 뿐만 아니라 용해로의 안정 운전에도 큰 영향을 미치게 된다.

유리 용해로의 자동제어를 위한 시도로써, Haber 등은 유리용해로의 유리물 레벨제어를 위한 모델링과 제어 방법을 제시하였다 [4]. 그들은 실험적인 데이터를 바탕으로 하여 세 개의 입력과 세 개의 출력을 갖는 선형모델을 설정한 후 이를 바탕으로 한 자기동조 제어(Self-Tuning Regulator) 기법을 적용하였다. Aoki 등은 유리용해로의 온도제어를 위한 퍼지제어 기법을 제시하였다 [5]. 그들은 유리용해로의 시간지연(Dead Time) 특성을 극복하기 위하여, 플랜트의 출력을 예측한 후, 이를 바탕으로 하여 퍼지제어기의 출력을 보완하는 방법을 제시하였다. Hadjili 등은 비선형 특성을 포함하는 유리용해로의 모델링을 위하여 Takagi-Sugeno 타입의 퍼지 시스템을 바탕으로 한 퍼지 모델링 방법을 제시하였다 [6].

자동제어의 관점에서, 유리 용해로는 하나의 공간에 가열과 냉각이 동시에 이루어지기 때문에 심한 상호 간섭이 존재한다. 또한, 가열과 냉각 공간에는 각각 다른 특성을 갖는 온도 센서(Sensor)들이 다수 설치되어 있으며, 열 공급을 위한 가열 포트와 냉각을 위한 냉각포트가 여러 개 존재하는 다변수 공정이다. 이러한 용해로의 내부 현상은 아직 완전하게 이해되지 못하여, 이의 내부 동역학을 정밀하게 묘사할 수 있는 수식모델은 존재하지 않는 실정이다. 따라서 용해로의 온도 제어는 아직도 숙련된 용해로 운전자의 몫으로 남아있다.

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. 이 때, 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.

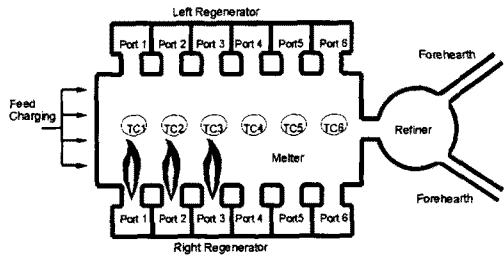


그림 1. 유리 용해로 상단면도.

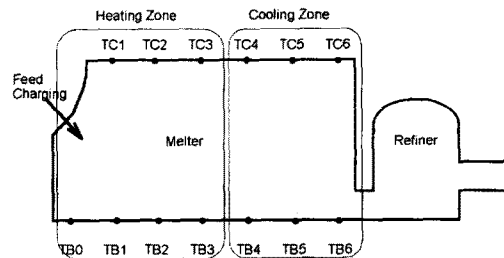


그림 2. 유리용해로의 종단면도.

그림 1과 2는 전형적인 유리 용해로의 구조로서 각각 상단면도 및 종단면도이다. 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 가루상대로 퍼스톤 또는 스크류 타입으로 공급되며, 그림 1, 2에서 멜터의 왼쪽에 나타내었다. 공급된 원료는 좌우의 포트들에서 벙커-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 유리를 적절한 온도로 식히기 위한 냉각 공기(CA, Cooling Air)를 공급한다. 냉각공기의 유량은 공급 공기 압력의 제어시스템과 함께 밸브를 조절하도록 구성되어 있다. 포트 1, 2, 3가 미리 예열된 연소공기를 이용하여 연소열을 공급하는 반면에 포트 4, 5, 6은 예열되지 않은 자연상태의 대기를 리버싱하지 않고 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 유리의 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. 용해로 모델링

3.1 입출력 변수 설정

용해로 온도 제어를 위해 다음과 같이 입출력 변수를 선정하였다.

출력: TC2, TC6, TB2
입력: BC총량, 포트 6 CA

이때 BC 총량은 다음과 같다.

$$\begin{cases} BC_1(k) = r_1 \cdot BC(k), \\ BC_2(k) = r_2 \cdot BC(k), \\ BC_3(k) = r_3 \cdot BC(k), \end{cases} \quad (1)$$

여기서, k 는 이산 시간 제어 스텝, BC , $BC1$, $BC2$, $BC3$ 는 각각 총연료 공급량(BC총량), 포트 1, 2, 3의 연료 공급량, 그리고 r_1 , r_2 , r_3 는 각각 포트 1, 2, 3의 연료 분배 비율상수이다. 이때, $r_1 + r_2 + r_3 = 1$ 이다.

결국, 용해로의 온도제어 문제는 BC와 CA을 조절하여 TC2, TB2, TC6를 일정하게 유지시키는, 2 입력 3 출력 문제로 귀결되어 진다.

3.2 용해로 모델

앞에서 선정된 용해로의 입출력 모델을 구하기 위하여 두 개의 입력 즉, BC총량과 포트 6 CA를 스텝으로 조절하여 출력에 변화를 유도하였다. 이와 같은 스텝 테스트 결과로 주어진 입출력 Data를 바탕으로 하여 그림 3과 같은 모델을 구하였다.

이때 그림3의 G1, G2, G3 그리고 G4는 다음과 같은 일차 시간지연모델 (First Order Plus Dead Time Model, FOPDT)이다.

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ts}}{s+1} \quad (2)$$

여기서, Y : 출력, U : 입력, K : 정상상태이득, T : 지연시간, τ : 시정수.

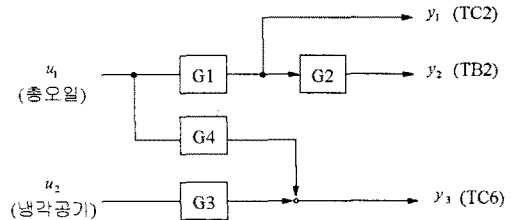


그림 3. 용해로의 전달함수 구조도

4. 제어기 설계

3.1 가열지역 제어

가열지역을 하나의 부 시스템 (Sub System)으로 본다면, 이 부 시스템의 입력은 BC, 출력은 TC2와 TB2이다. 이는 그림 3에서와 같이 G1과 G2가 Cascade로 연결된 시스템으로 볼 수 있다. 일반적으로 선행하는 전달함수 G1이 전달함수 G2보다 그 시정수가 작을 경우, Cascade 제어 구조로써 효과적으로 제어될 수 있음이 알려져 있다 [2]. 용해로의 경우 TC2의 시정수가 TB2보다 작기 때문에 Cascade 제어가 잘 적용될 수 있다. 그림 4는 가열지역의 제어 구조를 나타낸다.

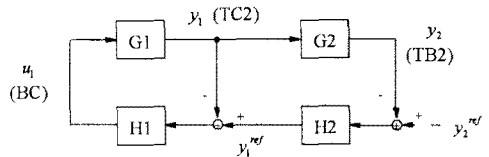


그림 4. 가열지역의 제어

H1의 경우, BC를 조절하여 TC2의 목표치(Setpoint)를 추종하는 제어기이다. 일반적인 FOPDT 모델의 경우 그 지연시간이 시정수에 비해 상대적으로 작다면, 이는 PI 제어기로서 효과적으로 제어할 수 있음이 알려져 있다 [1]. 따라서 H1은 G1의 FOPDT 모델을 바탕으로 하여

$$H_1(s) = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i1}s} \right) \quad (3)$$

한편, TC2의 목표값을 지정하기 위한 H2는 H1의 제어와 마찬가지로 PI 제어기의 형태로 구현하였다.

$$H_2(s) = K_{p2} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i2}s}\right) \quad (4)$$

4.2 냉각지역 제어

냉각지역을 하나의 부시스템으로 본다면 이는 2입력 1출력 시스템이 된다. 즉, BC와 CA에 TC6가 각각 반응하게 된다. 먼저 G3 제어를 위한 H3는 가열지역의 경우와 마찬가지로 모델을 바탕으로 한 PI제어기를 사용하였다.

$$H_3(s) = K_{p3} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i3}s}\right) \quad (5)$$

본 연구에서는 CA와 더불어, TC6에 영향을 미치는 BC에 대하여도 독립적인 제어 루프를 설계하였다. 즉, H4의 경우에는 가열지역과 냉각지역의 간섭을 상쇄하는 역할을 하게 된다.

$$H_4(s) = K_{p4} \left(1 + \frac{1}{\tau_{i4}s}\right) \quad (6)$$

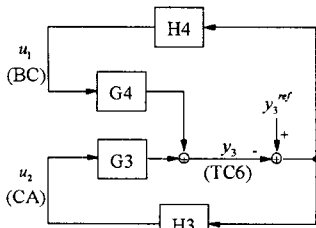


그림 5. 냉각지역의 제어

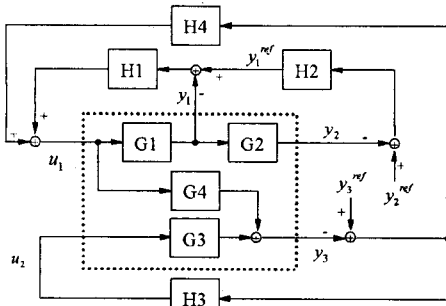


그림 6. 제시된 제어기의 전체구조

4. 적용 결과

제시된 제어기는 일일 생산량이 약 150 톤 규모인 수원의 삼성코닝㈜의 실제 생산라인 용해로에 직접 적용되었다. 실 적용 시에는, 현장에 설치되어있는 Foxboro사의 DCS 시스템에서 내부합수로 제공하는 PID제어 로직을 이용하여 구현되었다. 그림 7은 제시된 제어기를 사용한 전형적인 자동운전 데이터로써, 주요 온도인 TC2, TB2 그리고 TC6를 나타내었다. 총 3일간의 데이터이며, 각 온도의 단위차가 크기 때문에 평균값을 제거한 후 적당한 상수값을 더해서 하나의 그림으로 나타내었으며, 성공적으로 자동제어가 되었음을 알 수 있다.

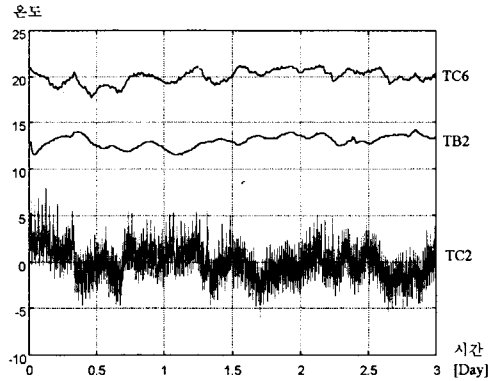


그림 7. 전형적인 자동운전 3일 데이터

5. 결론

본 논문에서는 TV 브라운관 유리용해로의 온도 제어를 위한 고전 고급 제어 (Conventional Advanced Control) 알고리즘을 제시한다. 용해로의 특성에 맞도록 중요한 입출력 변수를 선정 한 후, 공정 실험을 통하여 얻어진 데이터를 바탕으로 입출력 변수들간의 초보적인 FOPDT (First Order Plus Dead Time) 모델들의 조합으로 용해로를 모델링하였다. 수립된 모델을 바탕으로 주요 입출력을 PI (Proportional - Integral) 형태의 cascade 및 단일 계환 루프 (Single feedback loop) 들의 조합으로 제어기를 구성하였다. 제시된 알고리즘은 기존 용해로에 설치되어 있는 DCS를 이용하여 구현되었고, 일 150톤 생산 규모의 용해로에 성공적으로 실 적용되었다.

(참고 문헌)

- [1] C. A. Smith and A. B. Corripio, *Principles and Practice of Automatic Process Control*, John Wiley & Sons, 1985.
- [2] William L. Luyden, *Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineers*, McGraw-Hill, 1990.
- [3] 신준호, 조성일, 백기황, 모델예측제어 관련 기술, 제어자동화시스템 공학회지, vol. 5, no. 3, pp. 25-30, 1999.
- [4] R. Haber, J. Hethessly, L. Keviczky, I. Vajk, A. Feher, N. Czeiner, Z. Csaazer, and A. Turi, "Identification and adaptive control of a glass furnace", *Automatica*, vol. 17, pp. 175-185, 1981.
- [5] S. Aoki, S. Kawachi and M. Sugeno, "Application of fuzzy control logic for dead time process in a glass melting furnace", *Fuzzy Sets and Systems* 38, pp. 251-265, 1990.
- [6] M. Hadjili, A. Lendasse, V. Wertz and S. Yurkovich, "Identification of fuzzy models for a glass furnace process", *Proc. of the 1998 IEEE International Conference on Control Applications*, Trieste, Italy, pp. 963-968, September 1998.
- [7] T. Soderstrom and P. Stoica, *System Identification*, Prentice Hall, 1989.
- [8] R. Johansson, *System Modeling and Identification*, Prentice Hall, 1993.
- [9] A. M. Lopez, P. W. Murrill, and C. L. Smith, "Controller tuning relationships based on integral performance criteria", *Instrument Technology*, vol. 14, no. 11, p. 57, Nov. 1967.
- [10] F. G. Shinsky, *Process Control Systems*, McGraw-Hill, 1988.
- [11] Donald R. Coughanower, *Process Systems Analysis and Control*, McGraw-Hill, 1991.
- [12] Dale E. Seborg, Thomas F. Edgar and Duncan A. Mellichamp, *Process Dynamics and Control*, John Wiley & Sons, 1989.