

Dynamic PLS를 이용한 가열로 배가스온도 모델링

김영일

포항산업과학연구원 제철공정연구팀

Gas Temperature Modeling of a Reheating furnace based on Dynamic PLS

Young Il Kim

Iron& Steel Making Process Research Team at RIST

서론

철강업에서 가열로(reheating furnace)는 슬라브(slab), 빌레트(billet) 등을 균일한 목표온도까지 가열하는 주요한 공정이다. 가열로에 장입된 슬라브는 일반적으로 3~4개의 가열구간을 통과하고, 이때 슬라브는 차후 공정인 압연에 피해를 주지 않도록 최대한 목표온도에 근접해야하고 단면방향의 온도도 균일해야한다.

슬라브의 가열은 가열로내에서 전진하면서 각 가열구간의 특정 위치에 설치된 버너들에 의해서 이루어지며 가열의 불균일은 버너의 위치, nose부의 존재, 유입공기등의 영향을 받는다. 또한 슬라브의 가열로내에서 지지를 위해서 설치되는 skid 시스템의 skid pipe의 존재 때문에 복사의 방해와 전도의 상이성이 존재하고 이로인해 슬라브의 바닥에는 자취(skid mark)가 남게되고 skid beam의 위치에서는 심한 온도 편차를 보인다.

이러한 시스템 상황에서 슬라브의 내부 온도를 알기 위해서는 실제 조업에서 온라인으로 측정할 수 없으므로, 전열 해석 모델을 이용하고, 이러한 전열해석모델의 정확도는 소재의 물성치와 경계조건을 처리방법에 따라 크게 좌우된다.

본 연구에서는 후판 가열로의 슬라브온도 예측모델의 경계조건을 처리하기 위하여 필요한 가열로 내부 온도 분포를 길이 방향으로 추정하기 위한 모델을 dynamic PLS 기법으로 접근하는 방법을 제시하고 이를 이용하여 전열 해석 모델의 정확을 확보하는 것을 알아보고자 한다.

이론

1. 전열지배방정식

가열로 내부에 존재하게되는 슬라브의 비정상(nonstationary) 온도분포는 3차원 전도방정식으로 표현된다.

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) \quad (1)$$

일반적으로 공정제어를 위해서는 위의 슬라브 전체에 대한 3차원 모델을 활용하는 경우 푸는 시간의 제약 때문에 슬라브의 특정 위치별로 1차원 모델로 근사하여 처리하는 것이 일반적이다.

2. 전열 경계조건

가열로내에서의 경계조건은 연소가스(CO₂, H₂O, SO₂)와 벽면에서의 복사에 의해 대부분 지배되므로 이를 열유속 밀도의 형태로 표현하면 아래와 같다.

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = q_N \quad (6)$$

$$q_N = \frac{\epsilon_s \sigma}{[1 - (1 - \epsilon_s)(1 - A_{gs})]} (\epsilon_g T_g^4 - A_{gs} T_s^4) + \sigma \sum_{j=1}^N \epsilon_{sw,j} (T_{w,j}^4 - T_s^4)$$

여기서, 우변의 첫째항은 가스에 의한 열유속으로 $\epsilon_g A_{gs}$ 는 각각 가스의 복사율, 흡수율로서 연소가스의 조성, 슬라브온도, 가스온도, 가스층두께의 함수이고, 둘째항은 벽면과의 직접복사에 의한 것으로 $\epsilon_{sw} = \epsilon_s \epsilon_w \tau_{gm} f_{sw} + \Delta \epsilon_f$ 로 모델링된다. 형상인자(f_{sw})의 계산 방법은 Lindholm 방식을 수정하여 적용한다. 가스복사관련 모델은 Leckner의 방식을 적용한다. 이러한 경계조건에서 가열로내 위치별 가스온도(T_g) 분포를 얻는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 이 가스온도 분포를 얻기 위한 강건 모델을 개발하는 것을 목표로 둔다.

3. DPLS(Dynamic Projection to Latent Structure)

PLS는 변수들을 2개의 블록으로 나누어서 각 블록에 PCA를 실행하고 두 블록사이의 관계를 inner relation(가장 단순한 경우에는 least square regression시키는 것)으로 설정하는 구조로 되어 있다. 실제로 계산에 쓰이는 PLS모델은 NIPALS 알고리즘⁽⁷⁾의 특성 위에 만들어진다. PLS 모델은

입력 정보 X 와 출력정보 Y 로 각각 나타나는 outer relation과 두 블록사이를 연결짓는 inner relation으로 구성된다. X 와 Y 블록에 대한 outer relation은 다음과 같이 얻어진다.

$$X = TP^T + E = \sum_{h=1}^a t_h p_h^T + E$$

$$Y = UQ^T + F^* = \sum_{h=1}^a u_h q_h^T + F^*$$

여기서 T 와 U 는 각각 X 와 Y 블록의 score 벡터로 이루어진 score행렬이고, P 와 Q 는 각각의 loading 행렬이고, E 와 F^* 는 각각의 잔차이다. 위에서 a 는 얻고자하는 주요 인자(principle component)의 개수이고 모든 인자들이 이용되면 $E = F^* = 0$ 이 된다. 실제로는 $\|F^*\|$ 가 최저 값을 가지면서 X 와 Y 사이의 관계를 가장 잘 표현할 수 있는 최소의 a 개를 선정한다. 이때 X 와 Y 의 내부관계는 각 블록의 score 벡터들에 의해서 이루어진다. 선형 관계를 가정하고 이를 도시하면 그림1과 같다.

Y 블록이 단 변수(single variable)인 경우에는 PCR(Principal Component Regression)방법을 이용하여 관계식을 구성하는 것이 일반적이며 선형 관계식을 도출한다면 아래처럼 근사식을 구한다.

$$Y = T\beta^T + F$$

여기서 β 는 근사계수이고 $\beta = (T^T T)^{-1} T^T Y$ 로 얻어진다.

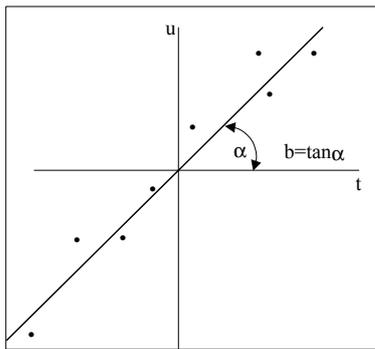


그림 1 The inner relation. A linear regression of u against t

이러한 기본 PLS구조에서 dynamic PLS를 구성하는 방법은 parametric model를 구성하는 기본 구조를 빌려와 아래와 같이 독립변수 및 종속변수를 구성함으로써 얻어진다. 먼저 단변수에 대한 FIR(Finite Impulse Response)모델 형식은 다음과 같고,

$$y(t) = a_0x(t) + a_1x(t-1) + \dots + a_lx(t-l)$$

이러한 형식을 가지도록 PLS모델을 만들기 위해서 X 블록은 다음처럼 구성되어야한다.

$$X_{FIR} = [X(t) X(t-1) \dots X(t-l)]$$

자주이용되는 또다른 형태의 모델 구조는 ARX(Auto regressive model with exogenous input)을 들 수 있고, 이것을 단변수에 대하여 적용한다면,

$$y(t) = b_1y(t-1) + b_2y(t-2) + \dots + b_my(t-m) + a_0x(t) + a_1x(t-1) + \dots + a_lx(t-l)$$

처럼 표현되고 이러한 형식을 가지는 PLS를 구성하기 위해서는 X 블록을

$$X_{ARX} = [Y(t-1) Y(t-2) \dots Y(t-m) X_{FIR}]$$

처럼 구성하면 된다. 즉 dynamic PLS는 X 블록에 독립변수나 종속변수의 과거치를 추가하여 일반적으로 구성한다.

실험

후판 가열로에 대하여 측은 실험을 통하여 얻어진 데이터를 바탕으로 가스온도를 예측하기위해서 여러 가지 모델을 시험하였다. 먼저 측정된 데이터들 중 분위기 가스온도에 영향을 미치는 대략적 인자를 선정하면 {소재위치, 노내압력, 가스/공기사용량, 노벽 열전대 온도}으로 정리되고 이들중 위치 및 압력을 제외하면 각대의 좌우상하에서 각각 측정되는 다차원변수들이다. 데이터 샘플링 시간은 30초등간격으로 이루어진다. 여기서 장입되는 소재들이 시험재와 동일한 강종으로 흡열효과가 거의 일정하다고 가정하여야 한다. 모델 개발 시에는 공기사용량을 직접이용하지 않고, 공기량을 가스량으로 나눈 공기비를 이용하였다. 이렇게 얻어진 데이터는 크기는 379x19(X:17, Y:2)이고, 그림2에는 위치에따른 온도를 도시하였다. 이들에 대하여 기본적인 처리과정(centering & scaling)을 거치고, 몇가지 모델 형식에 의해서 만들어진 결과는 그림3과 같다.

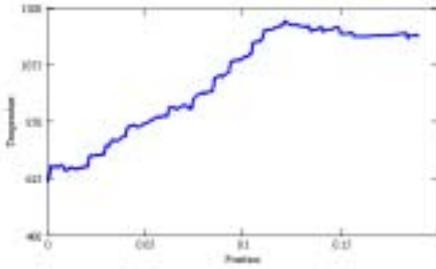


그림 2 가열로내 분위기 온도 분포

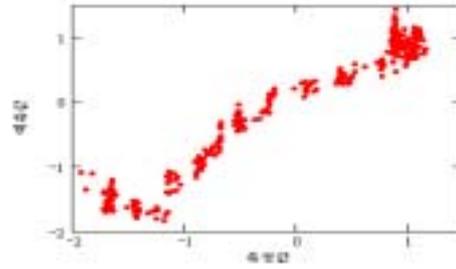


그림 3-a) 10PCs with 0 lag

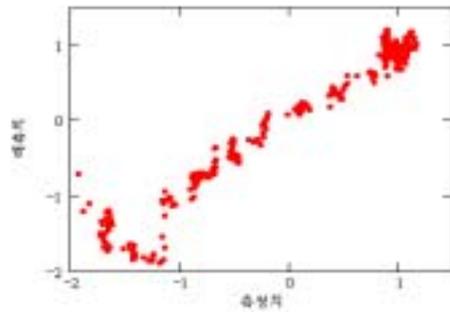


그림 3-b) FIR, 10PCs with 1 lag

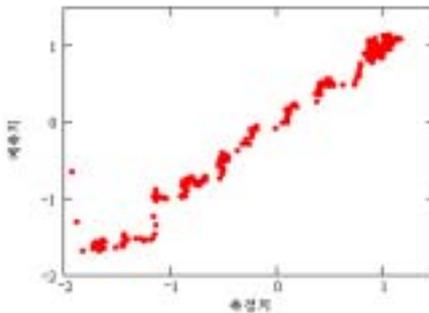


그림 3-c) ARX, 10PCs with 1 lag

그림3-a는 과거치를 이용하지 않는 일반적인 모델 형식의 PCR로서 16개의 독립변수를 가지는 것을 PLS처리 과정에 따라서 특성벡터를 구하는 과정을 거쳐 10개의 PC 얻고 이것을 이용하여 모델링한 것으로 $SSE(\sqrt{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2})=4.221$ 으로 얻어지고, 그림3-b는 순수 독립변수들에 대해서만 1 time sampling lag를 가지는 FIR형식의 모델로서 동일한 PLS처리 과정을 통하여 상대비교를 위하여 동일한 개수의 PC(10개)만을 활용한 모델로서 SSE는 3.931로 얻어졌다. 마지막으로 그림3-c는 X블록에 종속변수(y)의 과거치를 가지는 ARX형식의 모델로서 이 경우 SSE는 2.253로 얻어졌다.

결과 및 토론

전체입력 정보의 독립변수 16개인 것을 단순 PLS(16), FIR-PLS(32), ARX-PLS(33)에 대하여 적절한 개수의 주요 인자를 선정하고, 이들을 활용한 강건한 PLS모델을 얻고 서로간의 비교 평가하는 과정을 거쳐 종속변수의 과거치 정보를 활용하는 모델이 가장 강건한 모델인 것으로 판단된다. Inner모델에서는 선형식만을 활용하였는데 더 나은 결과를 위해서는 비선형 inner모델을 활용하는 것이 필요할 것으로 판단된다. 이런 PCA기반의 모델을 활용함으로써 슬라브 전열모델의 안정성도 더불어 향상될 것으로 본다..

참고문헌

1. Dag Lindholm, Bo Leden(1999),"A finite element method for solution of the three-dimensional time-dependent heat-conduction equation with application for heating of steels in reheating furnaces," Numerical Heat Transfer, Part A, 35,155-172
2. B. Leckner(1972),"Spectral and Total Emissivity of Water Vapor and Carbon Dioxide," Combustion and flame 19,33-48
3. Bobrie, M. and D. Louis(1986),"Computer control of billet furnaces based on physical models," pp. 359-378. MEFOS
4. Farmer, Larry K., Isaac S. Chan and James G. Nelson(1994),"Development of rapid gas heating process for semifinished steel products," Iron and Steel Engineer 71(9), 11-13

5. Shenvar, Fred(1994),"Walking beam furnace supervisory control at Inlands 80-in hot strip mill," Iron and Steel Engineer 71(7), 25-34
6. G.Baffi, E.B.Martin, A.J.Morris,"Non-linear dynamic projection to latent structures modelling," Chemometrics and Intel. Lab. Sys. 52, 5-22(2000)
7. Qin, S.J. and T.J. McAvoy(1992),"Nonlinear PLS modeling using neural networks," Computers Chem. Engng. 16(4), 379-391
8. Qin S.J. and T.J. McAvoy(1996),"Nonlinear FIR modeling via a neural net PLS approach," Computers Chem. Engng. 20(2), 147-159
9. Geladi,P. and B.R.Kowalski,"Partial Least-Squares Regression: A Tutorial," Analytica Chimica Acta 185, 1-17(1986)
10. Wold, S.K. Esbensen and P. Geladi,"Principal Component Analysis," Chemometrics and Intel. Lab. Sys. 2, 37-52(1987)
11. W. Ku et al.,"Disturbance detection and isolation by dynamic principal component analysis," Chemometrics and Intel. Lab. Sys. 30, 179-196(1995)