

모델예측 최적화를 이용한 제철공정 부생가스 공급 시스템의 Plantwide 최적화

김정환, 이희석*, 주영환, 김영재**, 한중훈
 포항공대 화학공학과, 포항공대 환경공학부*, 포항제철 에너지부 동력과**

Plantwide Model Predictive Optimization of Byproduct Gas Supply System in the Iron and Steel Making Process

Kim Jeong Hwan, Yi Heui-Seok*, Chu Young Hwan, Kim Young Jai, Han Chonghun**
 Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Department of Environmental Science and Engineering, Pohang University of Science and Technology*, POSCO Energy Dept.**

서론

제철공정은 조업경비의 약 20%를 에너지 비용으로 사용하고 있는 대표적인 에너지 다 소비형 공정이므로 에너지의 효율적인 이용은 매우 중요하다. 제철공정에서는 다른 공정과는 달리 철강제품을 만들어내는 과정에서 많은 부생가스가 발생하게 되므로, 이의 효율적인 이용이 매우 중요한 문제이다. 그러나, 부생가스는 다른 종류의 에너지원과 달리 장시간 보관이 어려우며, 그 발생이나 소비량이 불규칙하므로 관리하기가 더욱 어렵다. 그림1은 본 연구에서 대상으로 하고 있는 제철공정내의 부생가스 발생 및 소비공이다. 부생가스홀더는 각 부생가스의 발생 및 소비의 시간적 불일치를 해소하기 위하여 설치되는데, 그 용량의 한계가 있어서 홀더 용량을 초과하는 부생가스 발생과 소비 편차는 발전소에서의 부생가스 사용량을 조절함으로써 관리한다.

그러므로, 부생가스 공급시스템의 최적운전을 통한 에너지 절감을 이룩하기 위해서는 홀더영역에서의 최적화와 발전소 영역에서의 최적화가 동시에 고려되어야 된다. 홀더영역에서는 부생가스의 홀더레벨이 상한이나 하한을 넘지 않으면서 안정적인 운전을 하는 것이 주요목적이 되며, 발전소 영역에서는 오일의 소비량을 줄이고, 필요한 전력량을 만족하면서 보일러의 on/off를 줄이는 운전이 필요하다.

부생가스 최적화에 대한 기존의 연구로는 Akimoto et al.[3], Bemporad & Morari, [1]Fukuda et al.[4], Kim et al.[5] 등의 연구가 있으며, 산업계 적용사례로는 Sinha et al. [2]등의 연구가 있다. 이들의 연구 [1,3]에서는 홀더레벨의 유지 및 오일소비량의 감소에 초점을 맞추었으나, 부생가스의 홀더레벨 변동에 대한 전체적인 고려나 발전소 각 버너의 on/off에 대한 고려, 그리고 최적화에서 결정하는 최적값의 실제적용성 측면에서 단점을 보이고 있다. 본 연구에서는 공정전체의 최적화를 이룩하기 위하여 홀더영역과 발전소영역을 함께 고려하여 최적화 모델을 구성하고 있으며, 부생가스 홀더레벨의 변화를 예측, 예측에 기반한 최적의 운전을 결정하고 있다. 본 연구에서는, 복합버너 내의 버너 on/off에 대한 결정을 최적화 변수로 결정함으로써, 버너 on/off에 대한 switching cost에 대한 고려 및 최적화 결정값의 실제적용 용이성 측면에서 장점을 보이고 있다.

최적화 모델

최적화 모델은 혼합정수선형계획법(Mixed Integer Linear Programming)으로 구성하였으며, 최적화변수는 각 피리어드, 각 부생가스 버너 운전대수이다. 목적함수는 전체 계획영역(planning horizon) 동안의 비용 최소화로서, 홀더에서의 부생가스 방산 및 홀더 트립에 대한 페널티, High나 Low 홀더레벨에 대한 페널티와 발전소 영역에서의 오일연소 비용, 전력비용, 버너 on/off에 대한 페널티, 같은 보일러에서의 부생가스 동시 로드 변동에 대한 페널티 등으로 구성된다. 제약조건식은, 물질수지식(2), 스팀디맨드 만족 제

약조건식(3), 방산 및 트랩을 피하기 위한 홀더운전범위 제약조건식(4), 부생가스의 발생, 소비, 조정량에 따른 홀더레벨 변화식(5), 에너지수지식(6), 방산 및 트랩, 홀더레벨의 출렁거림에 대한 페널티 부과에 필요한 관련식들(7~11), 버너운전대수 변화관계식 및 페널티 부과 관련식(12~13), 동시버너교체 페널티 부과 관련식(14~17), 버너 입력 부생가스유량 제한조건식(18) 등이다.

$$= \text{Min}_{N_{i,t}^G, F_{i,t}^{Oil}} \left\{ C^{Oil} \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^{NB} F_{i,t}^{Oil} + \sum_{t=1}^P \sum_G w_{HH}^G S_{HH,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_G w_{LL}^G S_{LL,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_G w_H^G S_{H,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_G w_L^G S_{L,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_G w_{d^+}^G S_{d^+,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_G w_{d^-}^G S_{d^-,t}^G \right. \\ \left. + \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^{NB} \sum_G w_{SW}^G \Delta N_{i,t}^G + \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^{NB} \sum_G [w^{2s} (j_{2,i,t}^{G+} + k_{2,i,t}^{G-}) + w^{3s} (j_{3,i,t}^{G+} + k_{3,i,t}^{G-})] - \sum_{t=1}^P C^{elec} (PG_t - PD_t) \right\} \quad (1)$$

subject to,

$$F_t^G = \sum_i F_{i,t}^G \quad \text{for } \forall G, t \quad (2)$$

$$\sum_G F^G H_{i,t}^G + F_{i,t}^{Oil} H^{Oil} \geq Q_{i,t}^B \quad \text{for } \forall i, t \quad (3)$$

$$h_{\min}^G - h_{v,t}^G \leq h_t^G \leq h_{\max}^G + h_{e,t}^G \quad \text{for } \forall G, t \quad (4)$$

$$h_t^G = h_{t-1}^G + \left\{ G_{t-1} - C_{t-1} - \sum_i F_{i,t-t_d}^G \right\} * \Delta t \quad (5)$$

$$F_{i,t}^S (H_{out,i,t}^{steam} - H_{in,i,t}^{steam}) = \left(\sum_G Cp^G F_{i,t}^G + Cp^{Oil} F_{i,t}^{Oil} \right) \eta_{i,t} \quad \text{for } \forall i, t \quad (6)$$

$$h_t^G - h_{\max}^G = S_{HH,t}^G - S_{HH,t-d}^G \quad \text{for } \forall t \quad S_{HH,t}^G, SG_{HH,t-d}^G \geq 0 \quad \text{for } \forall G, t \quad (7)$$

$$h_t^G - h_H^G = S_{H,t}^G - S_{H,t-d}^G \quad \text{for } \forall t \quad S_{H,t}^G, SG_{H,t-d}^G \geq 0 \quad \text{for } \forall G, t \quad (8)$$

$$h_{\min}^G - h_t^G = S_{LL,t}^G - S_{LL,t-d}^G \quad \text{for } \forall t \quad S_{LL,t}^G, SG_{LL,t-d}^G \geq 0 \quad \text{for } \forall G, t \quad (9)$$

$$h_L^G - h_t^G = S_{L,t}^G - S_{L,t-d}^G \quad \text{for } \forall t \quad S_{L,t}^G, SG_{L,t-d}^G \geq 0 \quad \text{for } \forall G, t \quad (10)$$

$$h_t^G - h_N^G = d_t^{G+} - d_t^{G-} \quad \text{for } \forall t \quad d_t^{G+}, d_t^{G-} \geq 0 \quad (11)$$

$$N_{i,t}^G = N_{i,t-1}^G + N_{i,t}^{G+} - N_{i,t}^{G-} \quad \text{for } \forall G, t \quad (12)$$

$$N_{i,t}^G - N_{i,t-1}^G = SW_{i,t}^{G+} - SW_{i,t}^{G-} \quad SW_{i,t}^{G+}, SW_{i,t}^{G-}, SW_{i,t}^{Oil+}, SW_{i,t}^{Oil-} \geq 0 \quad \text{for } \forall G, i, t \quad (13)$$

$$N_{i,t}^{G+} = j_{1,i,t}^{G+} + j_{2,i,t}^{G+} + j_{3,i,t}^{G+} \quad \text{for } \forall G, t \quad (14)$$

$$j_{1,i,t}^{G+} \geq j_{2,i,t}^{G+} \geq j_{3,i,t}^{G+} \quad \text{for } \forall i, t \quad (15)$$

$$N_{i,t}^{G-} = k_{1,i,t}^{G-} + k_{2,i,t}^{G-} + k_{3,i,t}^{G-} \quad \text{for } \forall G, t \quad (16)$$

$$k_{1,i,t}^{G-} \geq k_{2,i,t}^{G-} \geq k_{3,i,t}^{G-} \quad \text{for } \forall i, t \quad (17)$$

$$F_{\min}^G \leq F_{i,t}^G \leq F_{\max}^G \quad \text{for } \forall i, t \quad (18)$$

사례연구

본 연구에서 제안하고 있는 모델의 적정성을 검증하기 위하여 사례연구를 수행하였다. 대상 시스템은 2대의 부생가스 홀더와 오일을 이용하여 필요한 에너지를 공급하고 있으며, 발전소에는 4대의 보일러가 있으며, 각 보일러에 입력되는 부생가스의 종류에는 제한이 없는 것으로 가정한다. 각 홀더의 조업운전범위는 표1과 같으며, 각 버너에서의 부생가스 사용량 변동단위는 표2와 같다. 보일러 1,2,3,4의 효율은 각각 0.8, 0.85, 0.82, 0.87로 가정하였다. 현재 조업을 기준으로 향후 30분간(매 피리어드는 5분씩)에 대한 예측을 기반으로 각 피리어드에서의 최적값을 결정하여, 기존의 모델을 이용한 최적화 결과와 비교하였다.

그림2와 3은 각각 A홀더와 B홀더의 레벨변화 예측값과 기존의 방법을 적용하였을 때의 홀더레벨 변화와 제안한 방법을 적용했을 때의 홀더레벨 변화를 보여주고 있다. 비교 결과는 두 방법 모두 홀더 레벨이 운전범위 내에서 운전되도록 조절되었음을 보여주고 있다. 표5는 목적함수를 구성하고 있는 각 비용항목의 값과 총비용을 보여주고 있다. 총비용을 비교한 결과, 제안한 방법은 기존의 방법보다 약 15%의 비용이 절감됨을 보여주고 있는데, 이는 보일러의 on/off 횟수를 줄이고 보일러의 효율을 고려하여 효율적인 부생가스 배분이 이루어졌기 때문이다. 즉, 기존의 방법은 홀더레벨의 유지와 오일소비량 감소에 치중하여 홀더레벨의 평균값으로부터의 변화는 작게 유지되고 있지만, 이를 수행하기 위한 버너의 로드변화가 많아져 전체비용이 상승하는 결과를 보여주고 있다. 그림4는 제3피리어드에서의 부생가스의 각 보일러로의 열량배분 결과를 보여주고 있는데, 효율이 높은 보일러에 보다 많이 배분하고 있음을 알 수 있다. 결국, 홀더와 발전소를 동시에 고려하여 관련된 비용항목을 함께 최적화 모델로 구성함으로써 전체 비용을 감소시킴을 확인하였다.

결론

본 연구에서는 제철공정의 부생가스 공급시스템의 최적운전을 위한 예측기반 최적화 모델을 제안하였다. 홀더레벨의 안정적인 운전과 발전소의 최적운전을 동시에 고려하여 최적해를 찾도록 최적화 모델을 구성하고 사례연구를 통하여 제안한 모델의 적정성을 확인해 보았다. 기존의 모델 및 현장에서의 조업이 주로 홀더레벨의 조업범위 내 운전 및 오일사용량의 감소에 치중하여 전체최적화 관점에서 수행이 되지 않아 추가적인 에너지 절감가능성이 존재한다. 또한, 제안한 방법은 기존의 방법과는 달리 현장에서의 보일러 로드변동이 버너단위로 이루어지고 있는 점을 모델에 반영하여 최적화변수를 연속변수가 아닌 정수변수를 이용하여 문제를 풀으로써 최적값의 실제적용이 보다 용이하다는 장점이 있다.

감사

본 연구에 재정적 지원을 해 주신 POSCO에 감사 드립니다.

참고문헌

- [1] A. Bemporad, M. Morari, "Control of systems integrating logic, dynamics, and constraints", *Automatica*, 35 (1999), 407-427.
- [2] G. P. Sinha, B. S. Chandrasekaran, N. Mitter, G. Dutta, S.B. Singh, A.R. Choudhury, P.N. Roy, "Strategic and operational management with optimization at Tata steel", *INTERFACES*, 25 (1995), 6-19.
- [3] K. Akimoto, N. Sannomiya, Y. Nishikawa, and T. Tsuda, "An optimal gas supply for a power plant using a mixed integer programming model", *Automatica*, 27 (1991), 513-518.
- [4] K. Fukuda, H. Makino, Y. Suzuki, S. Ishida, "Optimal energy distribution control at the steel works", *IFAC simulation of control systems*, Vienna, Austria. (1986), 337-342.
- [5] J. H. Kim, H. Yi, C. Han, "Optimal byproduct gas distribution in the iron and steel making process using mixed integer linear programming", *International Symposium on Advanced Control of Industrial Processes*, 2002 June 9-12, Kumamoto, Japan, 581-586.

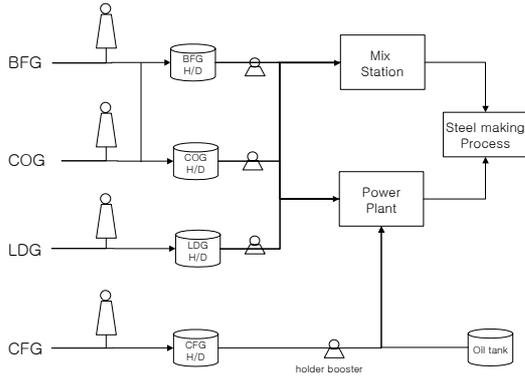


그림1. 부생가스 홀더 및 발전소

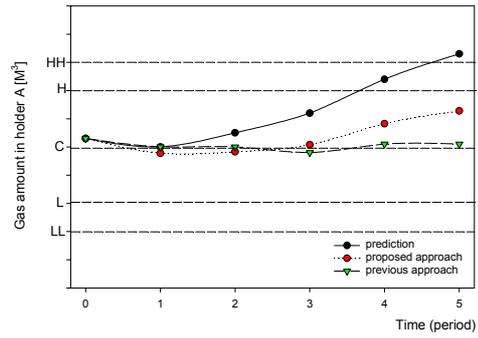


그림2. A 홀더 부생가스 레벨 변화

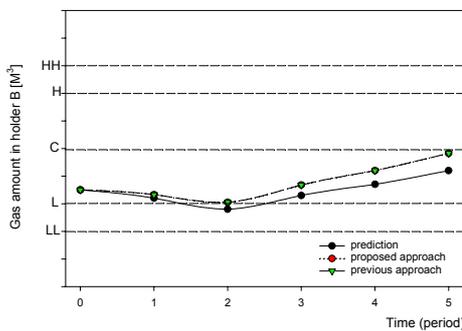


그림3. B 홀더 부생가스 레벨 변화

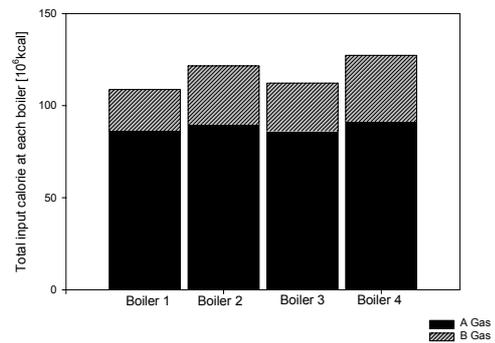


그림4. 각 보일러로의 부생가스 배분결과

표1. 부생가스 상하한 홀더 운전범위

	A Gas	B Gas
LL Operation Limit (M3/h)	40,000	30,000
L Operation Limit (M3/h)	50,000	40,000
Center operation (M3/h)	70,000	60,000
H Operation Limit (M3/h)	90,000	80,000
HH Operation Limit (M3/h)	100,000	90,000

표2. 보일러 로드변동 단위 (Nm3/h)

	Boiler 1	Boiler 2	Boiler 3	Boiler 4
A Gas	27,000	27,000	27,000	27,000
B Gas	10,000	10,000	10,000	10,000

표3. 총비용비교 (Won)

	Previous	Proposed
오일사용비용	0	0
부생가스 방산, 트랩, High, Low 운전페널티	0	0
평균레벨에서의 이격 페널티	441,875	573,125
부생가스 버너 on/off 비용	420,000	210,000
전력생산이익	-321,334	-317,727
총비용	540,541	465,897
연간조업비용차이	129,648,000 won/yr	