

황산 공장의 수율 최적화에 관한 연구

원 종 국, 조 영 상\* 이 춘 재, 정 태 경\*\*  
 \*한국과학기술원 화학공정연구실 \*\*남해화학 황산과, 공정과

Optimization of Conversion of Sulfur Dioxide in Sulfuric Acid Plant

J.K. Won, Y.S. Cho\* and C.J. Lee, T.G. Chung\*\*  
 \*KAIST \*\*Namhae Chemical Co.

Abstract

In this study, the computation of optimum operating conditions for catalytic oxidation of sulfur dioxide to sulfur trioxide in CONVERTER which determines the yield ultimately in sulfuric acid plant is performed on an IBM/XT computer. The process simulator of rigorous converter model including mass & energy balance equations and supporting equations is linked to optimizer, which produces the desired results successfully.

1. 서 론

황산 공장의 전환탑(converter)은 유황을 연소시켜 생성한 이산화황을 삼산화황으로 전환시키는 공정이며, 여기서 생성된 삼산화황은 흡수탑(absorber)에서 거의 전부 물과 반응하여 황산을 생성하므로, 전환탑의 이산화황의 전환율을 최적화하는 것은 곧 황산 공장의 수율 최적화를 의미한다. 더욱기 미반응 이산화황은 흡수탑에서 거의 흡수되지 않고 폐가스로서 대기로 방출되므로, 대기 오염 방지라는 측면에서 볼 때 전환탑의 최적화는 대단히 중요하다 할 수 있다. 전환탑의 주요 조업 변수는 원료 주입 온도, 주입 압력 그리고 주입되는 이산화황의 농도이며, 이 중 주어진 압력, 농도에서 최적 조업 온도를 찾는 것은 대표적인 조업 최적 설계(optimum operation design)의 한 예이며, 그 이유는 Fig. 1.을 보면 쉽게 알 수 있을 것이다.

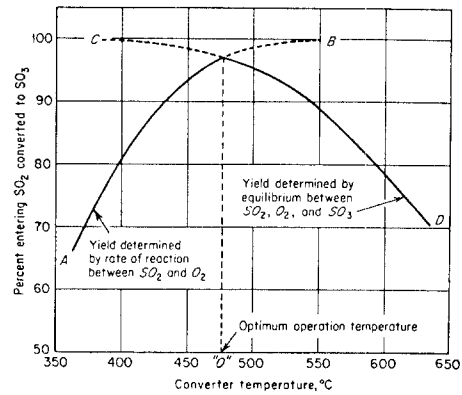


Fig. 1. Determination of optimum operation temperature in sulfur dioxide converter.

최적화 문제들은 대별해서 equality 혹은 inequality constraints의 유무에 따라 constrained problem과 unconstrained problem으로 나누며, objective function 과 constraints의 선형(linearity) 정도에 linear problem과 nonlinear problem으로 나누어진다. 실제 공장의 unit model은 함수가 비선형이고 많은 조업 제한 조건과 조업 변수들을 포함하므로 가능한 한 범용성을 지니는 optimizer를 구성해야한다. 예로부터 LP(linear programming)는 많은 연구가 행하여져 왔으며, (1) 일반적인 비선형 최적화 문제를 선형화(linearization)하여 powerful한 LP를 이용하여 해를 구하려는 많은 시도가 이루어져 왔는데(2,3), petroleum refinery

의 최적화 문제를 성공적으로 수행한 것이 MAP(method of approximation programming) 이다. MAP 는 IBM 704 system 을 이용하여 약 30개의 조업변수들과 100개의 비선형 조업 조건들을 푼 것으로 알려져 있으며, 본 연구를 통해서 MAP 의 구성 및 부분적인 결점의 보완, 그리고 전환탑 최적화예의 적용등을 행하였다.

## 2. Simulator 와 Optimizer 의 구성

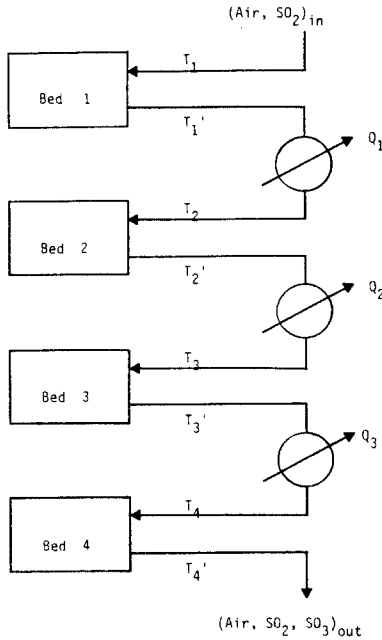


Fig. 2. Converter 의 단순화도

황산공장의 전환탑은 Fig. 2. 에서 보는 바와 같이 이산화황의 산화가 일어나는 4개의 촉매층으로 이루어져 있으며, 각 단 사이에 주입 온도의 조절을 위한 열교환기가 있다. 주요 조업 변수는 각 단의 주입 온도,  $T_1, T_2, T_3, T_4$  이며, 목적함수는 이산화황의 전환율이다. 즉,

$$F_{obj} = f(T_1, T_2, T_3, T_4) \quad (1)$$

$$T_{i,min} \leq T_i \leq T_{i,max} \quad (i=1, \dots, 4)$$

이때 조업 제한 조건 (constraints) 은 열교환기의 용량이며, 열교환기는 team 을 이용하여 냉각하므로 계산의 간편화를 위해서 다음과 같이 가정한다.

$$Q_j = K_j \cdot F_s \cdot (T_j' - T_s), \quad (j=1, \dots, 3) \quad (2)$$

이때  $K_j$  는 주어진 계수이며  $T_s$  는 steam 의 온도,  $F_s$  는 steam 의 flow rate 이다. 따라서 열교환

기 주위의 열수지식을 이용해서 구한  $Q_j = Q_j(T_j', T_{j+1}) = Q_j(T_j, T_{j+1})$  는 다음 식을 만족해야 한다.

$$Q_{j,min}(T_j, F_{s,min}) \leq Q_j \leq Q_{j,max}(T_j, F_{s,max}) \quad (3)$$

$$(j=1, \dots, 3)$$

(1), (3) 식을 MAP 을 이용해서 풀었으며 MAP 의 알고리즘은 Fig. 3. 과 같다.

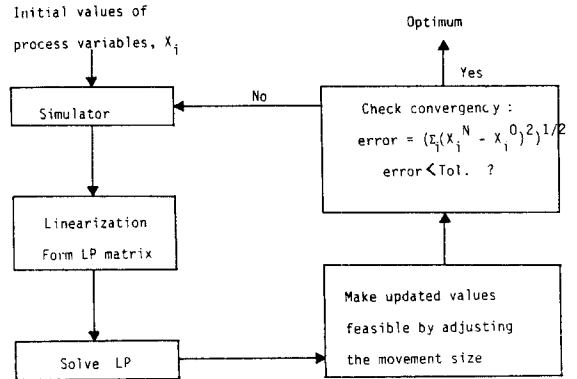


Fig. 3. The MAP system

## 3. 결론

본 연구를 통해서 MAP 은 많은 조업 변수와 비선형 조업 제한 조건들을 가진 실제 PLANT 의 최적화에 적합한 것으로 판단되며, 결론적으로 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

(가) 비선형 (nonlinearity) 정도에 따라 계산 시간이 크게 좌우 된다.

만일 선형 문제 (linear problem) 라면 단 1번에 optimum 을 찾아가게 되며, 비선형 정도가 커질수록 LP 가 real optimum 을 찾기 힘들기 때문이다. 또한 MAP 이 global optimum 에 수렴할 충분한 조건은 concave objective function, convex constraint space 인데, 실제 plant 의 공정은 비선형 정도가 그다지 심하지 않으므로 크게 문제되지 않을 것으로 사료된다.

(나) 초기치가 계산 시간과 수렴도에 가장 큰 영향을 미친다.

여러개의 local optima 가 존재할 경우, 초기치의 선택에 따라서 global optimum 에 수렴하지 못하는 경우가 있다. 그러나 실제 plant 의 공정은 조업 구간이 그다지 넓지 않으므로 적용하는데 큰 어려움은 없을 것으로

사료된다.

결국 MAP은 사용자가 문제의 형태를 파악한 정도와 스스로의 경험에 따라 계산시간과 수렴도가 결정된다고 할 수 있다.

#### Reference

1. Saul I. Gass, LINEAR PROGRAMMING, McGRAW-Hill Co., 1975
2. R.E. Griffith, and R.A. Stewart, "A Nonlinear Programming Technique for Optimization of Continuous Processing System", Management Sci., 7 (1961), 379
3. H.O. Hartley, "Nonlinear Programming by The Simplex Method", Econometrica, 29(1961), 223