공급망 관리를 고려한 실제 규모의 정유공정의 일정계획 모델

송제훈, 박형진, 이동엽, 박선원
한국과학기술원 화학공학과

Scheduling Model for Refinery Processes of Actual Size Considering Supply Chain Management

Jehoon Song, Hyungjin Park, Dong-Yup Lee, Sunwon Park
Department of Chemical Engineering, KAIST

서론

최근의 정유공정은 다음과 같은 특징이 있다. '규모의 경제'라는 측면에서 용량이 커지면서 단위시간당 처리량이 많고, 계절과 국제정세에 따라 수요와 공급의 변동이 심하다. 그리고 에너지 비용과 원유의 가격, 그리고 운전비용이 상승하는 추세에 있다. 이러한 상황에서 빈약한 일정계획은 큰 경제적인 손실을 가져올 수 밖에 없다. 더군다나 최근에는 부분의 최적이 전체의 최적이 아니라는 전제하에, 원료의 구매단계부터 운송, 저장, 생산, 그리고 최종 생산물의 판매단계에 이르기까지 전 과정을 최적화 하여 경제적 이익을 극대화하려는 공급망관리(Supply Chain Management)를 수행하려는 회사들이 증가하고 있다.

정유공정의 일정계획에 대한 연구의 흐름은 다음과 같다. Shah[1]는 정유공정에 원유를 공급하는 일정계획을 수립할 때 수학적 프로그래밍 기법을 도입하여, 원유저장탱크로부터 혼합탱크, 그리고 상압증류시설에 이르는 원유이동의 간단한 모델에 적용하였다. Lee 등[2]은 일정계획 대상을 확장하여, 유조선으로부터의 하역과정에서의 비용과 각종 탱크에서의 재고비용을 고려하는 간단한 모델을 세웠다. Pinto 등[3]은 송유관으로부터 최종제품에 이르는 비교적 큰 규모의 모델로 일정계획을 세웠다. Park 등[4]은 제어이론을 응용한 '2단계 접근법'을 통해, 혼합정수계획법으로 문제를 풀 때 시간이 많이 걸리는 점을 보완하고 이를 정유공정의 일정계획을 수립하는데 적용하였다.

본 논문에서는 유전(油田)으로부터 생산품에 이르는 전과정을 일정계획의 대상으로 확장하고 실제 규모의 자료를 이용하여 '장난감 문제 풀이용'이 아닌, 실제로 적용 가능한 모델을 제시하고자 한다.

문제기술

Fig. 1.은 일정계획 범위를 도식적으로 나타낸다.

5개의 서로 다른 유전으로부터 용량이 다른 8척의 유조선으로 운송한 후 23개의 원유저장탱크에 각각 저장하여 용량이 다른 10개의 혼합탱크에서 혼합한 다음, 4개의 상압증류시설을 거쳐 8개의 생산품을 생산하는 일괄 공정이다.

주된 운전 제약은 다음과 같다.

- 유조선, 원유저장탱크, 혼합탱크 등의 용량
- 생산품의 수요
- 혼합탱크에서의 원유의 품질
- 각 공정에서의 공급유량

수학적 모델

모델링에 앞서 몇 가지 가정이 필요하다.

- 한 원유증류시설에서 원유공급탱크를 바꾸는 데는 시간이 걸리지 않는다.
- 혼합탱크에서는 완전혼합이 일어난다.
- 원유증류시설에 원유를 공급하는데 추가적인 혼합은 요구되지 않는다.
- 각 탱크에서의 원유의 품질은 원유의 특정성분의 함량이 결정한다.

▪한 유조선은 특정 유전으로부터 특정 원유를 이미 할당된 특정 원유저장탱크에 공급한다.
▪모델링은 균일 이산 시간 표현(uniform discrete time representation)를 기반으로 한다.

(1)최적화 목적

총 이익 = {생산품판매수익}-{원유구입비용}-{용선료}-{하역비용}-{체선료}-{탱크에서의 재고비용}-{상압증류시설에서의 공급원유교체비용}-{상압증류시설의 운전비용}

$$PROFIT=\sum_{p=1}^{P}PRICE_p\times TOT_{prod,j}\div D_{prod,p}-\sum_{c=1}^{C}\sum_{v}^{V}C_{crude,c}\times V_{vessel,v}$$
$$-\sum_{c=1}^{C}\sum_{v=1}^{V}C_{charter,v}\times V_{vessel,v}\times D_{crude,c}-\sum_{v=1}^{V}C_{unload,v}\times\left(T_{L,v}-T_{F,v}+1\right)$$
$$-\sum_{v=1}^{V}C_{stay,v}\times\left(T_{F,v}-T_{ARR,v}\right)-\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T}C_{inv\_ST,i}\times\left(\frac{V_{S,i,t}+V_{S,i,t-1}}{2}\right)$$
$$-\sum_{j=1}^{J}\sum_{t=1}^{T}C_{inv\_BT,j}\times\left(\frac{V_{B,j,t}+V_{B,j,t-1}}{2}\right)-\sum_{t=1}^{T}\sum_{j=1}^{J}\sum_{j'=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}C_{setup,j,j',l}Z_{j,j',l,t}$$
$$-\sum_{j=1}^{J}\sum_{l=1}^{L}\sum_{u=1}^{U}C_{operate,j,l,u}\times PRO_{j,l}\times D_{blend,j}$$

(2)제약식

▪유조선의 입항과 출항에 대한 규칙

-각 유조선은 하역하기 위해 단 한 번 입항과 출항한다.

$$\sum_{t=1}^{T}X_{F,v,t}=1,\qquad \sum_{t=1}^{T}X_{L,v,t}=1\qquad \forall v$$

-하역 시작 시간과 하역 종결시간은 다음의 식으로 결정된다.

$$T_{F,v}=\sum_{t=1}^{T}tX_{F,v,t},\quad T_{L,v}=\sum_{t=1}^{T}tX_{L,v,t}\qquad \forall v$$

-각 유조선은 입항 후 하역하며, 먼저 입항한 유조선이 출항하지 않으면 다른 유조선이 입항할 수 없다.

$$T_{F,v}\geq T_{ARR,v},\qquad T_{F,v+1}\geq T_{L,v}\qquad \forall v$$

-각 유조선은 하역에 필요한 최소 시간보다 오래 항구에 머무른다.

$$T_{L,v}-T_{F,v}+2>DURATION(v)\qquad \forall v$$

-하역 시작시각과 하역 종결시각 사이에 하역이 가능하다.

$$X_{W,v,t}\leq\sum_{m=1}^{t}X_{F,v,m},\quad X_{W,v,t}\leq\sum_{m=t}^{T}X_{L,v,m}\qquad \forall v$$

▪유조선에 대한 물질수지

-시각t에서의 유조선의 원유의 양은 유조선의 최초 원유량에서 t시각까지 원유저장탱크로 이동된 원유의 양을 뺀 것과 같다.

$$V_{V,v,t}=V_{V,v,0}-\sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{t}F_{VS,v,i,m}\qquad \forall v,t$$

-시각t에서 한 유조선에서 어떤 원유저장탱크로 이동될 수 있는 유량은 한계가 있다.

$$F_{VS,v,i,\min}X_{W,v,t}\leq F_{VS,v,i,t}\leq F_{VS,v,i,\max}X_{W,v,t}\qquad \forall v,i,t$$

-최종적으로 한 유조선으로부터 원유저장탱크로 이동된 총 원유량은 유조선의 최초 원유량과 같다.

$$\sum_{i=1}^{I}\sum_{t=1}^{T} F_{VS,v,i,t} = V_{V,v,0} \qquad \forall v$$

▪원유저장탱크에 대한 물질수지

-시각t에서의 한 원유저장탱크 안의 원유량은 최초 탱크에 있었던 양과 유조선으로부터 이동된 원유량의 합에서 혼합탱크로 빠져나간 원유량을 뺀 것과 같다.

$$V_{S,i,t} = V_{S,i,0} + \sum_{v=1}^{V}\sum_{m=1}^{t} F_{VS,v,i,m} - \sum_{j=1}^{J}\sum_{m=1}^{t} F_{SB,i,j,m} \qquad \forall i,t$$

-한 혼합탱크에서 어떤 상압증류시설로 원유가 이동하는 동안에는 원유저장탱크에서 그 혼합탱크로 원유가 이동되지 못한다.

$$F_{SB,i,j,\min}\left(1-\sum_{l=1}^{L} D_{j,l,t}\right) \le F_{SB,i,j,t} \le F_{SB,i,j,\max}\left(1-\sum_{l=1}^{L} D_{j,l,t}\right)$$

-시각t에서 원유저장탱크의 저장능력에는 한계가 있다.

$$V_{S,i,\min} \le V_{S,i,t} \le V_{S,i,\max} \qquad \forall i,t$$

-시각t에서 원유저장탱크에서 혼합탱크로 흐른 원유의 축적량은 그때까지 흐른 총 원유량의 합과 같다.

$$CF_{SB,i,j,t} = CF_{SB,i,j,t-1} + F_{SB,i,j,t} \qquad \forall i,j,t$$

▪혼합탱크에 대한 물질수지

-시각t에서의 한 혼합탱크 안의 원유량은 최초 탱크에 있었던 양과 원유저장탱크로부터 이동된 원유량의 합에서 상압증류시설로 빠져나간 원유량을 뺀 것과 같다.

$$V_{B,j,t} = V_{B,j,0} + \sum_{i=1}^{I}\sum_{m=1}^{t} F_{SB,i,j,m} - \sum_{l=1}^{L}\sum_{m=1}^{t} F_{BC,j,l,m} \qquad \forall j,t$$

-시각t에서 상압증류시설로 이동할 수 있는 유량에는 한계가 있다.

$$F_{BC,j,l,\min} D_{j,l,t} \le F_{BC,j,l,t} \le F_{BC,j,l,\max} D_{j,l,t} \qquad \forall j,l,t$$

-시각t에서 혼합탱크의 저장능력에는 한계가 있다.

$$V_{B,j,\min} \le V_{B,j,t} \le V_{B,j,\max} \qquad \forall j,t$$

-시각t에서 혼합탱크에서 상압증류시설로 흐른 원유의 축적량은 그때까지 흐른 총 원유량의 합과 같다.

$$CF_{BC,j,l,t} = CF_{BC,j,l,t-1} + F_{BC,j,l,t} \qquad \forall j,l,t$$

▪생산품에 대한 물질수지

-최종 생산품은 생산품의 수요보다 적으면 안 된다.

$$PRODUCT_p \ge DEMAND_p \qquad \forall j$$

▪혼합탱크에서 성분k에 대한 물질수지

-시각t에서 한 혼합탱크에서 k성분의 양은 최초 가지고 있던 k의 양과 원유저장탱크로부터 이동되어 온 k의 양의 합에서 상압증류시설로 빠져나간 k의 양을 뺀 것과 같다.

$$v_{B,j,t} = v_{B,j,0} + \sum_{m=1}^{t}\left(\sum_{i=1}^{I} f_{SB,i,j,m} - \sum_{l=1}^{L} f_{BC,j,l,m}\right) \qquad \forall j,k,t$$

-원유저장탱크로부터 혼합탱크로 이동될 수 있는 k의 양은 다음과 같다.

$$f_{SB,i,j,k,t} = F_{SB,i,j,t}\, x_{S,i,k} \qquad \forall j,k$$

-혼합탱크로부터 상압증류시설로 이동되는 k의 양은 한계가 있다.

$$F_{BC,j,l,t}x_{B,j,k,\min} \le f_{BC,i,j,k,t} \le F_{BC,j,l,t}x_{B,j,k,\max} \quad \forall j,k,l,t$$

-시각t에서 혼합탱크가 함유할 수 있는 k의 양은 한계가 있다.

$$V_{B,j,t}x_{B,j,k,\min} \le v_{B,j,k,t} \le V_{B,j,t}x_{B,j,k,\max} \qquad \forall j,k,l,t$$

▪상압증류시설에 대한 운전 규칙

-시각t에 한 혼합탱크는 하나의 상압증류시설에만 원유를 공급할 수 있고, 또 하나의 상압증류시설은 하나의 혼합탱크로부터 원유를 공급 받을 수 있다.

$$\sum_{l=1}^{L} D_{j,l,t} \le 1, \qquad \sum_{j=1}^{J} D_{j,l,t} \le 1 \qquad \forall j,l,t$$

-상압증류시설이 시각t-1에 혼합탱크j에서 원유를 공급받다가, 시각t에 j 에서 공급받으면, 상압증류시설로의 원유 공급선이 바뀐 것이다.

$$Z_{j,j',l,t} \ge D_{j',l,t} + D_{j,l,t-1} - 1 \qquad \forall j, j'(j \ne j'), l, t$$

⑶결정변수

▪각 유조선, 원유저장탱크, 혼합탱크, 상압증류시설 간의 원유와 성분k의 유량

▪유조선 하역 시작시각과 종결시각 ▪상압증류시설에서 원유 공급선 교체

⑷매개변수

▪각종 원유, 유조선, 원유저장탱크, 혼합탱크, 상압증류시설, 유틸리티, 가격 등의 자료[5,6]

감사의 글

이 논문은 두뇌한국21사업에 의하여 부분 지원되었기에 감사드립니다.

참고문헌

1. Shah, N.: *Computers Chem. Engng.*, **20**, S1227(1996)
2. Lee, H., Pinto, J.M., Grossmann, I.E. and Park, S.: *Ind. Eng. Chem. Res.*, **35**, 1630(1996)
3. Pinto, J.M., Joly, M. and Moro, L.F.L.: *Computers Chem. Engng.*, **24**, 2259(2000)
4. Park, H., Bok, J. and Park, S.: *J. of Chem. Eng. of Japan*, (2001, accepted)
5. 대한석유협회, "석유연보", (1998)
6. 대한석유협회, "석유의 이해", (1995)

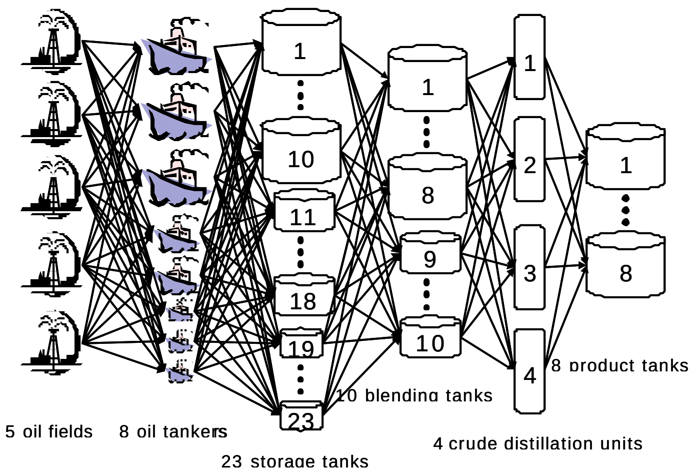

Fig. 1. Graphical overview of refinery systems.