

화학/정유 산업에서의 공급 네트워크 설계 및 운영 최적화

김 영, 박선원

한국과학기술원 생명화학공학과

1. 서 론

글로벌화가 진행되고 중국과 중동이 새로운 강력한 정유와 화학 산업의 공급자로 떠오르게 되면서 기존 공급 국가들에게 커다란 위험 요소로 여겨지고 있다. 특히 우리나라와 같이 중동 등지에서 원료를 수입해오는 국가에게는 중동의 풍부한 자원, 중국의 자원과 노동력에 맞서는 치열한 가격 경쟁과 시장 점유율 확보의 이중고가 예상된다.

이러한 급변하는 세계정세에 대응하기 위해서 화학 회사들의 인수·합병도 활발히 일어나고 있으며, 다가오는 위기에 공감하여 동종 또는 이종 업계의 회사를 사이에서 생산성과 효율성을 높이기 위한 다양한 협력도 이루어지고 있다. 학계에서도 대형화, 통합화가 핵심 논제로 떠오르고 있으며, 때를 맞추어 타 산업에서 글로벌 경쟁력을 갖추기 위한 요건으로 중요시 되고 있는 SCM(Supply Chain Management, 공급사슬관리)의 여러 기법들을 적용하기 위한 연구도 활발히 이루어지고 있다.

2. SCM과 글로벌 경쟁력

글로벌화에 의한 위기와 기회는 산업 전반에 닥쳐, 공급과 수요의 채널이 다양해지고 가격경쟁도 치열해지고 있다. 최근 수년간에 걸쳐 성공적인 SCM 체계를 먼저 구축한 기업들이 경쟁에서도 앞서가고 있다. AMR 리서치의 2005년 Supply Chain Top 25 회사들에는 델, P&G, IBM, 노키아, 도요타와, 한국 기업으로서는 삼성전자가 7위로 평가되었고, 포스코가 2004년 16위를 기록하였다[19]. 2004년에는 Top 25 회사들의 순위에 들지 못했던 삼성 전자가 몇 년 사이에 이루어 낸 성과를 보면 놀랍다. 2004년의 재고 회전율과 판매실기 방지율은 2001년 대비 각각 170%와 138% 증가하였는데, 이는 순위 안의 다른 회사들과 비교해서도 아주 높은 향상을 이룬 것이다. 그 외에도 공급 사슬 전반에 걸친 노력을 하여, 같은 기간 매출과 수익이 크게 증가하였다고 한다. 삼성전자가 세계적인 기업으로 성장하는데에는 SCM에 대한 노력도 한몫을 한 것이다.

물론 이 자료의 기준이 절대적이라고 말할 수는 없다. 기본적으로 각 산업의 특징이 다른데다, 측정기준이 무수히 많을 수 있기 때문이다. 공급사슬경영을 실천한다는 것은, 정보공유를 위한 IT 시스템의 도입은 기본이고, 효율적인 네트워크 구조, 만족스럽고 비용이 적게 드는 수/배송, 업무 전반에 걸쳐 낭비를 줄이는 린(lean) 경영, 식스 시그마(six sigma) 경영 등등 수

표 1. 2004년, 2005년 SCM 선진 기업들 (자료: 미국 컨설팅 회사 AMR research)

순위	2004	2005
1	Dell	Dell
2	Nokia	Procter&Gamble
3	Procter&Gamble	IBM
4	IBM	Nokia
5	Wall-Mart Stores	Toyota Motor
6	Toyota Motor	Johnson&Johnson
7	Johnson&Johnson	삼성전자
8	Johnson Controls	Wall-Mart Stores
9	Tesco	Tesco
10	PepsiCo	Johnson Controls
11	Nissan Motor	Intel
12	Woolworths	Anheuser-Busch
13	Hewlett-Packard	Woolworths
14	3M	The Home Depot
15	GlaxoSmith-Kline	Motorola
16	포스코	PepsiCo
17	Coca-Cola	Best Buy
18	Best Buy	Cisco Systems
19	Intel	Texas Instruments
20	Anheuser-Busch	Lowe's
21	The Home Depot	Nike
22	Lowe's	L'Oreal
23	L'Oreal	Publix Super Markets
24	Canon	Sysco
25	Marks&Spencer	Coca-Cola

많은 도구들을 이용하여 수익 증가, 저렴한 가격, 고객 만족도 증가 등의 전략 목표를 달성하는 것이다. 이 과정은 꾸준한 노력과 인내심을 필요로 하면서도, 해 오던 업무에 대한 고정관념을 깰 참신한 아이디어들을 필요로 하므로 정해진 답이나 절대적인 평가 기준이 있을 수가 없다.

예를 들어, 전자 산업에서는 제품의 수명주기가 아주 짧으므로, 재고를 최대한 줄여야 새 제품이 나왔을 때 이전 버전의 제품이 안 팔리는 경우 손해를 최소화할 수 있다. 그러나 화학 산업의 경우에는 제품의 주기가 비교적 길고, 수급 안정성이 중요하므로, 재고를 무조건 없앨 수는 없다. 따라서, 이 25개 회사의 순위에는 포함되지 않았지만, 다른 많은 기업들도 공급사슬 경영의 실천을 위해 노력하고 그로부터 성과를 얻고 있을 것임을 예상할 수 있다.

3. 산업의 특징과 공급 네트워크 구조

정유/화학 산업은 원료와 제품의 가격 변동이 심하고 원료의 수급 안정을 유지하는 것이 중요하다. 또한 단일한 원료로부터 나오는 제품과 중간물질의 종류가 다양하여 복잡한 생산 네트워크를 이룬다. 공장에서 출하된 제품들은 타 산업과는 다른 특수한 운송수단을 이용하여 소비자들에게 전해진다. 그럼 1은 화학제품의 R&D부터 생산단계를 거쳐, 물류에 이르기까지의 Global Life Cycle을 보여주며, 각 단계의 크기 단위와 시간 단위를 나타내었다.

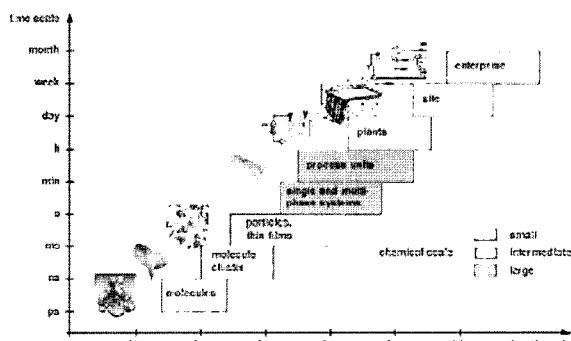


그림 1. 화학제품의 공급 사슬[5]

정유 산업의 공급 단계를 간단히 정리해 보면 다음과 같다. 먼저, 산유국으로부터 원유를 수입하여 유조선에 실어 와서 정유 공장에서 가까운 항만에 원유를 저장해 놓는다. 저장된 원유는 파이프라인, 탱크로리, 작은 유조선 등으로 다시 공장으로 운송되어 정유 과정을 거치고 제품 종류별로 저장 탱크에 저장되게 된다. 휘발유, 경유, 중유, 등유 등의 유류 제품의 경우 이

곳에서 다시 파이프라인, 탱크로리, 유조화차 등을 이용하여 저 유소나 대리점으로 운송이 되고, 저유소로부터 탱크로리로 각 주유소에 배달된다.

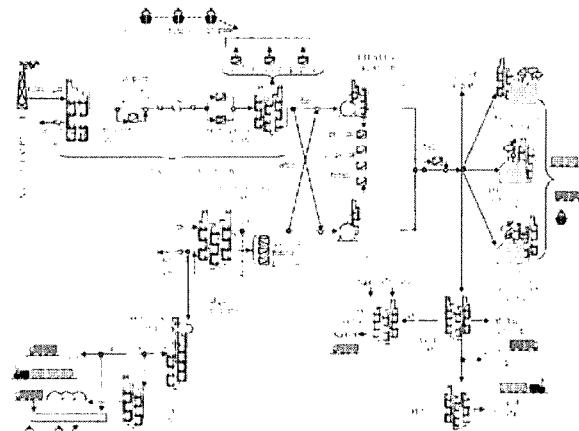


그림 2 석유화학단지 모델[17]

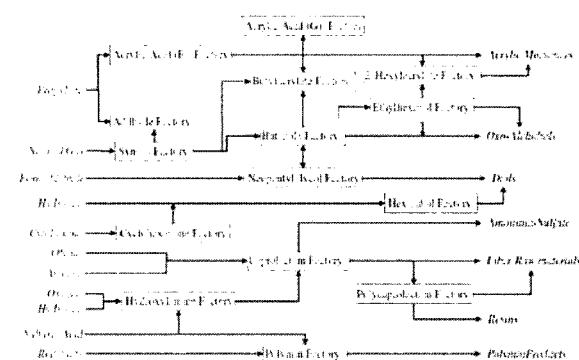


그림 3. 통합된 생산 시스템의 예[4]

정유 공정의 또 다른 생산물인 납사는 수많은 화학제품의 원료로 사용된다. 국내에서 수급되는 납사의 양은 수요에 못 미쳐 약 60% 정도가 중동으로부터 유조선으로 운송되어 수입되고 있다. 납사는 석유화학공장에서 에틸렌, 프로필렌, 부타디엔, 벤젠, 크릴렌의 기초 원료로 분해(cracking) 된 후, PE, PVC, PS, PP, 합성고무, 합성세제, 나일론 등의 석유화학제품을 만드는 원료로 사용된다. 그림 2와 그림 3은 석유화학 단지와 통합된 생산 시스템의 예이다. 이렇게 만들어진 석유화학제품들은 고체의 경우 일반 화물과 비슷한 트럭과 선박을 이용하나 제품을 다루는 데 특별한 주의가 필요한 것이 많고, 액체나 기체의 경우 파이프라이ning, 탱크 커터이너 등을 이용하게 된다.

이러한 각각의 특징들에 의해 정유/화학 산업의 공급 네트워크는 다른 산업과는 다른 특성을 지니므로 다른 산업과 차별화된 관점에서의 연구가 필요하다.

4. 공급 네트워크 설계

공급 네트워크의 설계는 원료수송, 생산/부산물 네트워크, 제품 수송의 세 단계로 나누어 생각할 수 있다.

4.1 원료 수송

원료의 수송은 대부분 유조선이나 파이프라인에 의해 이루어지는데 특히 유조선의 경우, 항만 시설을 이용하고 원료의 적재·하역과 이에 따른 수속 절차, 검사, 세관을 거치는 등의 복잡한 과정을 거친다. 그럼 5에 원유 구매의 프로세스 맵이 묘사되어 있다. 이 때, 항만 터미널에 정박하는 데 드는 비용, 양·하류에 걸리는 시간, 원료 선적에 사용되는 빈 텅크 컨테이너의 수급(그림 4)과 clean-up 할 수 있는 터미널, 예기치 않게 발생할 수 있는 이벤트 등 까지 고려하여 고객의 요구에 맞추면서도 적은 비용으로 공급하기 위한 최적의 경로를 찾는 문제가 생긴다.

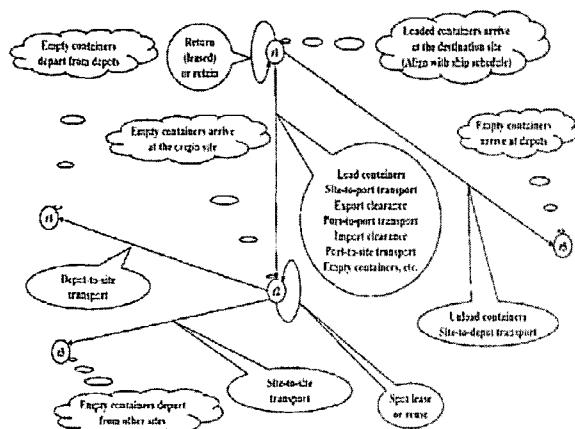


그림 4. 원료 주문과 컨테이너 수급 과정[12]

4.2 생산/부산물 네트워크

정유 공정에서의 유류제품군과 납사로부터 나오는 석유화제품들의 경우 공통의 기초 원료를 사용하거나 같은 첨가재료를 사용하는 경우가 많아서, 각 공정에서 만들어진 제품과 부산물을 잘 활용하면 멀리서부터 원료를 사오지 않고 가까운 곳으로부터 더싼 가격으로 제때에 공급받을 수가 있다. 그럼 6은 이러한 생산 네트워크의 예이다. 이 경우, 수요와 공급이 발생하는 시기와 양의 균형을 맞추는 문제와, 발생하게 되는 이익을 어떻게 배분할 것인가를 결정하는 문제가 중요하다. 이러한 문제를 해결하기 위해서는 각 공장으로 들어가는 원료와 생산되는 제품에 대한 모델링과 수요, 공급의 일정이 필요하다. 그런

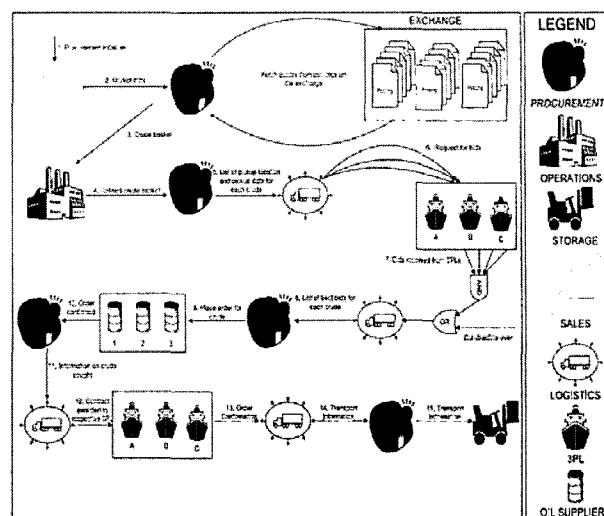


그림 5. 원유 구매의 프로세스 맵[8]

데, 증류탑에서는 여러 가지의 제품이 동시에 생산되고, 조업 조건에 따라 생산 비율이 바뀔 수 있으며, 이러한 공장과 네트워크로 연결되는 또 다른 공장의 숫자가 많기 때문에 대개 문제의 크기가 아주 커지고, 복잡한 혼합정수선형계획 문제(mixed integer linear programming) 문제가 되어 풀기가 어려워진다. 이 문제를 해결하기 위해서 여러 가지 방법론(heuristics), 유전자 알고리즘(genetic algorithm), dynamic programming, 공정 그래프(process graph)를 이용한 접근방법 등이 도입되고 있으며, 한편으로는 수요지로의 수송 문제까지 통합하려는 노력도 동시에 이루어지고 있다.

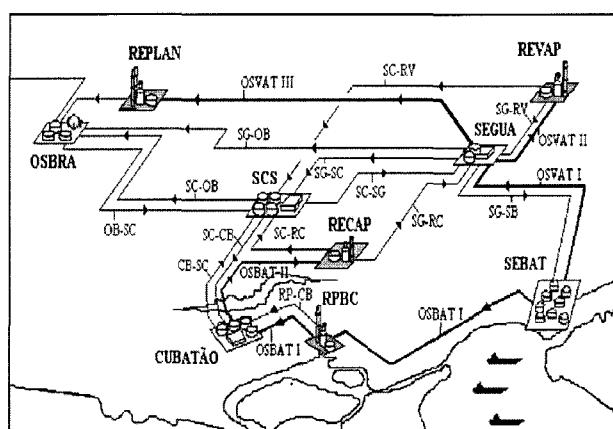


그림 6 생산/부산물 네트워크의 예 [16]

4.3 제품 수송

제품 수송 네트워크의 설계 문제 중 설비 위치결정(facility location) 문제. 윤송 경로 문제는 산업 공학이나 네트워크 이론

에서 오래 전부터 관심을 가져온 고전적인 문제이다. MIP (mixed integer programming) 만으로 위치 결정 문제는, 아주 간단하게 표현된 물류망에서도 해를 구하기 어려운 NP-hard (nondeterministic polynomial-time hard) 문제임이 밝혀져 있다(15). 그 외에도 설비의 크기 결정 문제, 효율적 서비스를 위한 수요지의 클러스터링 등 현실적인 최적해를 제시하기 위한 여러 시도들이 계속되고 있다. 그러나 아직 많은 가정들이 포함되어 있고, 실제 크기의 문제에 적용하기는 아직 어려운 것이 많다. 게다가, 제품의 종류가 늘어남에 따라 계산량이 몇 배로 더 많아지는 경우는 더욱 다루기가 어려워진다. 제품 수송에서 또 하나의 이슈는 급작스레 발생하는 주문이나 사고에 어떻게 유연하게 대처할 수 있는가 하는 것 등이 있다.

제품 수송에서 또 하나의 이슈는 급작스레 발생하는 주문이나 사고에 어떻게 유연하게 대처하는 방법에 대한 것인데, 이를 SCEM (Supply Chain Event Management)라고 한다. 기존에 만들어진 수송 네트워크를 다시 설계하는 데에는 많은 비용과 정확한 계산, 이해 당사자들 간의 협력이 필요한 데 비해, SCEM은 긴급 상황이 발생하였을 때, 각 부분의 공급자들이 고려할 수 없는 상황까지 파악하여 사태에 대응할 수 있는 최선의 방법을 제시할 것으로 기대되고 있다.

5. 공급 네트워크 운영

공급 네트워크의 운영은 전략과 일정 계획 수립을 포함하며, 네트워크 전반에 걸친 효율 향상을 위하여 노력한다. 대부분 먼저 ERP(Enterprise Resource Planning)을 도입하여, 현재의 실태를 파악하고 그로부터 측정된 데이터들을 바탕으로 앞으로의 개선 부분을 찾는다. IT 시스템의 도입은 처음 적용하는 데 노력이 소요되나, 보이지 않는 낭비를 찾아내고 현재의 상황을 정확히 파악하는 데 도움을 준다. 물류에서 IT의 도입은, 화물의 수/배송 상태를 알려주어 이미 많은 성과를 거두고 있다.

일정 계획은 원하는 시기에 원료를 수급하기 위한 유조선의 일정, 생산일정, 저유소나 창고의 재고 보충 빈도와 양, 운송 단위의 운행 빈도 등을 결정한다. 공급 네트워크 운영의 문제는 그 외에도 비용을 최소화하기 위해 소유 차량의 최적 용량과 대수를 구하기도 하고, 다른 기업과의 협력이나 이웃소싱이 얼마나 유리할 것인가를 결정한다.

6. 결 론

최근 국내에서는 복수 풀 사용제에 대한 논쟁이 활발하다. 이

제도는 한 주유소에서 여러 회사의 휘발유를 판매할 수 있게 하는 제도로서 소비자에게 선택의 폭은 넓혀줄 것이다. 특정 브랜드의 풀을 달고 다른 회사의 제품을 판매하는 것에 대해 정유사들의 반대에 부딪치고 있다. 그런데 정유사들을 경쟁시키면 더싼 가격에 공급받을 수 있을 것이라는 주유소업계의 생각과는 달리, 물류의 측면에서는 비용이 훨씬 많이 들고 관리 및 운영 면에서 여러 가지로 어려움이 많이 발생하게 될 것이다. 이 때, 어느 정도 심각한 문제를 어떻게 해결할 것인가에 대한 질문도 공급 네트워크 설계 및 운영 연구의 필요성을 보여준다.

공급 네트워크 최적화의 운영 측면에서는 발생하는 문제를 관찰할 수 있는 현장에서 문제를 찾고 해결해나갈 점이 많다. 현장에서의 지속적인 개선 과정은 쉽지는 않지만 가장 빠른 성과를 가져올 수 있다. 한편, 공급 네트워크의 설계 측면에서는 아직 문제 구성 방법이나 수퍼 컴퓨터 등 계산 도구의 사용이 정립되지 않았다. 이제 세계의 무역은 오가는 빈도가 점점 커지고 있으므로, 효율적이고 강력한 네트워크의 구축으로 따라오기 힘든 경쟁력을 먼저 확보하는 것이 중요하다. 앞으로 학계의 활발한 의견교환과 적극적인 탐색으로 더욱 실용적인 공급 네트워크에 대한 고민, 글로벌화에 앞서 나가는 시도로 새로운 시장을 개척해 나가야 하겠다.

참고문헌

- [1] 서영복, 김채복, “공급사슬 프로세스 개선을 통한 판매실기 방지 및 재고 감축”, 춘계 SCM 학회, 2006.
- [2] J. Bok, I. E. Grossmann and S. Park, “Supply chain optimization in continuous flexible process networks”, Industrial and Engineering Chemical Research, vol. 39, pp. 1279-1290, 2000.
- [3] M.R. de Almeida, S. Hamacher, MAC Pacheco and M.M.B.R.Vellasco, “Optimizing the production scheduling of a petroleum refinery through genetic algorithms”, International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice, vol. 10, pp. 35-44, 2003.
- [4] K. Ferdows and C. Carabetta, “The effect of inter-factory linkage flexibility on inventories and backlogs in integrated process industries”, International Journal of Production Research, vol. 44, pp. 237-255, 2006.
- [5] I. E. Grossmann, “Challenges in new millennium: product discovery and design, enterprise and supply chain optimization, global life cycle assessment”, Computers

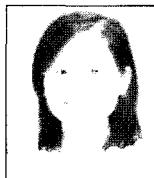
- and Chemical Engineering, vol. 29, pp. 29-39, 2004.
- [6] G. Guillen, M. Badell, A. Espuna and L. Puigjaner, "Simultaneous optimization of process operations and financial decisions to enhance the integrated planning/scheduling of chemical supply chains", vol. 30, pp. 421-436, 2006.
- [7] G. Guillen, F. D. Mele, M. J. Bagajewicz, A. Espuna and L. Puigjaner, "Multiobjective supply chain design under uncertainty", Chemical Engineering Science, vol. 60, pp. 1535-1553, 2005.
- [8] N. Julka, I. Karimi and R. Srinivasan, "Agent-based supply chain management-2: a refinery application", Computers and Chemical Engineering, vol. 26, pp. 1771-1781, 2002.
- [9] J. Kallrath, "Solving planning and design problems in the process industry using mixed integer and global optimization", Annals of Operational Research, vol. 140, pp. 339-373, 2005.
- [10] J. Kallrath, "Planning and scheduling in the process industry", OR Spectrum, vol. 24, pp. 219-250, 2002.
- [11] J. Kallrath, "Combined strategic and operational planning - an MILP success story in chemical industry", vol. 24, pp. 315-341, 2002.
- [12] I. A. Karimi, M. Sharafali and H. Mahalingam, "Scheduling tank container movements for chemical logistics", AIChE Journal, vol. 51, pp. 178-197, 2005.
- [13] H. Lee, J. M. Pinto, I. E. Grossmann and S. Park, "Mixed-integer linear programming model for refinery short-term scheduling of crude oil unloading with inventory management", Industrial and Engineering Chemical Research, vol. 35, pp. 1630-1641, 1996.
- [14] F. D. Mele, G. Guillen, A. Espuna and L. Puigjaner, "A simulation-based optimization framework for parameter optimization of supply-chain networks", Industrial and Engineering Chemical Research, vol. 45, pp. 3133-3148, 2006.
- [15] S. Melkote and M. S. Daskin, "An integrated model of facility location and transportation network design", Transportation Research Part A, vol. 35, pp. 515-538, 2001.
- [16] S. M. S. Neiro and J. M. Pinto, "A general modeling framework for the operational planning of petroleum supply chains", Computers & Chemical Engineering, vol. 28, pp. 871-896, 2004.
- [17] E. P. Schulz, M. S. Diaz and J. A. Bandoni, "Supply chain optimization of large-scale continuous processes", Computers and Chemical Engineering, vol. 29, pp. 1305-1316, 2005.
- [18] M. Stoughton and T. Votta, "Implementing service-based chemical procurement: lessons and results", vol. 11, pp. 839-849, 2003.
- [19] AMR Research, <http://www.amrresearch.com>.

..... 저자야력



《박 선 원》

- 1970년 서울대학교 화학공학과 학사
- 1983년 Oklahoma State University 화학공학과 석사
- 1979년 University of Texas at Austin 화학공학과 박사
- 1979년 University of Houston - Clear Lake (MBA)
- 1988~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 교수
- 관심분야 : 공정 최적화, 설계 및 제어, 화학 산업 경영 및 정책 수립



《김 영》

- 2003년 한국과학기술원 생명화학공학과 학사
- 2003~현재 한국과학기술원 생명화학공학과 박사과정
- 관심분야 : 정유/화학 산업의 공급 네트워크 최적화, 일정 계획 수립