

# Using chemical process simulation to design industrial ecosystems

- Casavant TE, Raymond P. Journal of Cleaner Production 2004;12;901-908

## 1. 서론

산업생태학은 기본적 개념에다 시스템적 관점과 생태학적 법칙들을 덧붙여서 개선되어 왔다. 그 중 특히 산업 대사공학이란 생태산업단지에서의 물질흐름과 에너지흐름을 중점적으로 보는 학문이다. 이것은 각각의 공정이나 회사를 따로 보지 않고 전체적으로 묶어서 생각함으로써 분석의 규모를 넓혀 적용한다는 점에서 중요하다.

Diwekar와 Small은 산업생태학자들이 복잡한 시스템을 이해하기 위하여 원래 화학공학자들이 주로 쓰는 물질수지와 에너지 수지를 사용한다는 것과 아직 화학공정모사프로그램(Chemical process simulation (CPS))같은 화학공학적인 도구는 많이 쓰고 있지 않다는 것에 주목하였다. 또한 다른 산업에서도 장치를 설계하고 검토하기 위해 모사기를 많이 사용한다는 것과, 화학공학자들이 공정 플랜트를 설계, 검토, 최적화, 통합하기 위해 CPS를 사용하므로 산업생태학자들에게도 생태산업단지를 설계하고 운전하는데 있어서의 문제해결에 CPS가 유용한 도구가 될 것이라 예측하였다.

## 2. Chemical process simulation (CPS)

CPS는 공정 플랜트를 모형화하기 위해 고안된 소프트웨어 프로그램이다. CPS는 아직 존재하지 않거나, 운전하기 위해서 많은 비용이 소요되는 시스템에서 특히 유용하지만, 최근엔 보다 작은 규모거나 비교적 전통적이지 않은 공정산업에도 쓰이고 있다. 화학공학자들은 복잡한 시설의 설계나 개조를 하는데 CPS를 사용하고 있다. CPS를 사용하여, 화학공학자들은 한 부분에서 공정을 바꾸었을 때의 잠재적이고 전체적인 효과를 결정할 수 있다. CPS software package는 ASPEN Plus, CADSIM Plus, CHEMCAD, Gensim, Hysys 등이 있다.

CPS의 근본적인 목적은 화학공학자들이 복잡한 물질, 에너지 수지를 맞추는데 도움을 주기 위한 것이다. 따라서 CPS가 어떻게 작동되는지 알기 위해서는 CPS가 어떻게 물질수지와 에너지 수지를 푸는지에 대해 이해해야 한다.

### 2.2.1. 물질, 에너지 수지

공정 플랜트를 설계하거나 운전상의 문제를 풀 때, 화학공학자들은 공장을 단위공정으로 나눈다. 또한 모든 단위공정과 모든 전체 공정은 하나 이상의 유입과 배출이 있다. 이 유입이나 배출들을 공정흐름이라 부른다. 이것은 물질 또는 에너지 흐름으로 대표된다. (손실도 포함). 물질변환은 반응, 혼합, 분리 등을 포함한다. 따라서 물질 수지는 한 생산물의 수율, 슬러지의 흐름, 폐수처리 시스템에서 생산된 처리된 물, 보일러에서 배출 GHG (greenhouse gas; 온실가스)의 흐름 등을 설명할 수 있다. 에너지 변환은 가열, 냉각, 상변

환, 기계적인 일을 포함한다. 에너지 수지는 일정한 스팀을 생산하는데 얼마나 많은 열이 필요한가, 탱크에서 다른 단위공정으로 일정한 액체의 흐름이 이동하는데 하나의 펌프가 필요한 전기에너지는 얼마큼인가, 평균적인 집에서 필요한 에너지 수요를 충족시키기 위해 얼마나 많은 태양 패널판이 필요한가 등에 대해 결정할 수 있다.

정상 상태 공정에서 한 단위공정 또는 단위공정의 집합체에서 물질수지는 이와 같다.

$$\text{유입량} + \text{생성량} = \text{생산량} + \text{손실량} + \text{소비량}$$

물질은 반응 공정을 통해 생산, 소비될 수 있다. 생산량은 생산흐름의 양을 의미하며, 손실량은 폐기물이나 부산물 흐름의 양을 나타낸다.

정상상태 공정에서 한 단위공정 또는 단위공정 집합체에서 에너지 수지는 이와 같다.

$$\text{유입에너지} + \text{추가에너지} = \text{배출에너지} + \text{손실에너지}$$

유입에너지는 보통 물질의 잠열 혹은 내부에너지를 의미한다. 예를 들면 한 물질이 단위공정에 들어왔을 때 이미 특정한 온도를 가지고 있으므로 이 물질은 열에너지를 갖고 있다. 추가에너지는 열 (가열 또는 냉각) 혹은 기계적 (압력변화 또는 혼합) 에너지이다. 손실에너지는 움직이는 부분에서의 마찰 혹은 비효율적이어서 오는 손실에너지, 가열된 폐기물 흐름 (굴뚝가스 또는 뜨거운 폐수 등)이다.

### 2.2.2. Process flow diagrams (PFDs)

공정을 나타내는 가장 좋은 방법 중의 하나는 공정흐름도 (process flow diagram (PFD))이다. PFD를 보는 것은 물질과 에너지수지를 작성하는데 첫 번째 단계이다. PFD는 수지 문제를 정의하는데 도움을 주며 가능한 모든 단위공정과 stream 정보를 조직하는데 좋은 수단이며, 공정에 대해 개략적으로 빠르게 알기를 원하는 사람들을 훈련하고 가르치는데 좋은 도구이다. 대부분의 CPS 프로그램들은 사용자가 공정 PFD를 그림으로써 공정 정보를 접근할 수 있도록 그래픽 인터페이스로 되어 있다. 간단하게 단위공정들이나 파이프들(공정간 연결)을 더하거나 제거함으로써 모형을 바꿀 수 있다. 모사를 위해 PFD는 블랙박스 모형처럼 간단하게, 혹은 공정의 자세한 제어회로를 표현할 수 있다.

PFD가 그려지는 동안, 프로그램은 모사 모형을 형성하기 시작한다. 성분의 개수, 공정의 개수와 종류, 각각의 공정에서의 유입과 배출흐름의 개수, 제시되어 있는 온도나 압력 등을 기본으로 하여 프로그램은 물질과 에너지 수지를 풀기 위해 입력되어야만 하는 최소한의 정보를 결정하고 사용자에게 그 정보에 대해 알려준다. 필요한 정보의 양이 입력되면 프로그램은 실행되고 물질수지와 에너지수지는 계산된다. 공정 문제는 PFD나 공정 자료에 변화가 생기면 새로운 물질과 에너지 수지 값을 얻기 위해 프로그램을 실행시키는 반복 절차로 풀다.

## 3. 생태산업단지에 CPS를 적용

CPS는 이미 많은 산업에서 크고 복잡한 장치를 모형화 하는데 사용되고 있다. 생

태산업단지도 많은 회사들을 포함하기 때문에 일반적으로 문제를 해결하는데 시간이 꽤 많이 필요하거나 비용이 많이 들므로 CPS를 실용적으로 사용할 수 있다.

단위공정 단위로 나누어 생각하여 나중에 합치던 전통적인 화학공학 설계와 반대로, Casavant와 Cote는 각각의 회사를 단지 두 부분 (boiler systems와 나머지 공정) 으로 나누어 생각하는 'big picture' 개념을 도입하였다. 이와 같은 통합적인 접근은 각각의 회사의 boiler systems를 설계하는데 이용되었다. 내부의 세부사항 (scrubbers, pumps, valves, control loops등)은 포함되지 않았다. 겉에서부터 공정을 설계하는 방법이 도입되면서 모델을 세우는데 필요한 시간은 현격히 줄어들었고, 연결을 통해 얻어지는 잠재적 환경 평가를 계산함으로써 예비 의사 결정을 할 수 있다.

Casavant는 보드지와 관련된 회사 5개로 구성된 생태산업단지를 구성하였다. 생태산업단지를 PFD로 그리면서, Casavant는 CPS 프로그램 중 하나인 CADSIM을 이용하여 전체적인 생태산업단지와 마찬가지로 각각의 단위공정에서의 몇몇의 인자들을 계산하기 위하여 모형을 만들었다. 이러한 인자들은 연료유 소비량, 물 흡입량, 폐수 생성량, 고상폐기물 생성량, SO<sub>2</sub> 배출량, CO<sub>2</sub> 배출량, 폐열 생성량이 포함된다. 그 때, 잠재적인 연결이 개별적으로 또는 여러 가지 조합으로 고려되었고 CPS 프로그램은 그 때마다 시스템의 인자들을 재계산하였다. CPS 프로그램이 복잡한 물질과 에너지 수지계산을 수행하는 속도는 복잡한 물질과 에너지 연결 계획들의 영향을 쉽게 결정할 수 있도록 해준다. 예를 들면, Minus Basin Pulp and Power사로부터 나온 폐열이 온실을 위한 저압스팀으로 재생되면 온실의 연료 소비량이 연 20%가 줄어드는 것이 결정되었다. CPS software는 네 개의 회사에서 섬유 순환을 하게 되면 연결이 없었던 그 전의 경우와 비교하여 매립되는 고상폐기물을 91% 줄일 수 있다는 것을 계산할 수 있었다.

실제 생태산업단지를 구성할 경우엔 이 예시처럼 비슷한 상품을 생산하는 회사들 간의 연결이 아니라 생산품 종류가 다양한 회사들 간의 연결이 불가피할 것이다. 그 경우에는 주로 용수나 스팀 연결이 주를 이루게 될 것이며 그 연결을 기본으로 하여 폐기물의 원료화까지 범위를 넓혀나갈 수 있을 것이다. 또한 각각의 공정을 최적화했을 때보다 전체적으로 공정을 최적화하면 최적화시킬 수 있는 범위가 넓어져 선택가능성이 넓어지는 이점이 있다.

설계된 생태산업단지는 아직 초기단계이고 설계자체가 제한되어있다. 또한 좀 더 정확한 계산을 위해서는 결국엔 공정의 자세한 세부사항이 필요하다. 그렇지만, 모형은 회사 간의 잠재적인 연결계획의 정량적인 평가를 해줄 수 있고, 예비 의사 결정을 도와주는 충분한 정보를 제공하며, 더 기술적이고 재정적인 평가로 나아가도록 도와준다.

#### 4. 생태산업단지 설계 시 CPS 사용했을 때의 장점

CPS를 사용하여 생태산업단지를 설계하고 운전하게 되면, 시스템 안에 있는 회사들이 얻을 수 있는 잠재적인 환경적이고 재정상의 이익을 정량적으로 결정하는데 도움을 준다. 산업 생태학은 그것의 이론을 뒷받침할 수 있는 자료의 부족으로 인해 비판을 받아왔는데, CPS는 그것을 극복할 수 있게 도움을 준다. 게다가 환경적이고 재정상의 정량적인 평가는 생태산업단지 구축을 지원할 수 있도록 회사를 확신시키는데 도움을 줄 것이다.

환경적인 문제들이 비선형적으로 보이고 많은 경우 직관적이지 않을 뿐만 아니라 특히 시스템 관점에서 볼 때 복잡성이 증가하고 있다. 연구들은 개별적인 공정보다 전체 공

정을 시스템으로 보아 최적화하는 것이 높은 효율과 낮은 환경적인 영향을 이룰 수 있다고 보여주고 있다. 그러나 최적 솔루션을 찾기는 쉽지 않다. 예를 들면, 배출량을 줄이는 것이 항상 전체적인 환경 영향을 줄일 수 있지는 않다. Stefanis는 VCM 생산공정을 사례로 연구(1995) 하였는데, 그는 전체적인 생산과정을 고려할 경우(global system)와 고려하지 않을 경우(conventional system)로 나누어서 최적화를 해보았다. conventional system은 말 그대로 VCM 자체 공정만을 system으로 놓은 것이고, global system은 VCM 공정뿐만 아니라 VCM의 원료가 되는 Cl<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, Ethylene을 제조하는 과정까지 포함한 system이다. (예 : Ethylene의 경우 Naphtha에서 Ethylene 생성공정까지 모두 포함하는 등) 그 결과는 하나의 오염을 최적화시키면 다른 종류의 오염 정도가 늘어났고 개별적인 시스템이 아니라 전체적인 시스템 안에서 동시에 여러 종류의 오염을 최적화시킬 때 전체적으로 더 낮은 환경적 영향이 이뤄질 수 있었고, 공정 운전 비용이 낮아졌다. (이 논문에서 생태산업단지 형성을 위한 시설비용까지 고려하여 운전 비용을 계산했는지는 나타나있지는 않다.)

또한 시스템 관점으로 보아 전체적인 환경적인 영향의 최소화가 목적이 되면 각각의 단위공정의 최적화를 생각할 때보다 선택할 수 있는 방법이 넓어진다. 의사 결정권자들은 경제적, 사회적, 환경적 영향들을 비교 검토하기 때문에 환경적 영향을 최소화시키는 하나 이상의 최적 방법의 존재는 그들로 하여금 여러 가지 안을 제공할 수 있다. 하지만 시스템 관점으로 보게 되면 주어진 상호 연관된 공정들로 이루어진 시스템 안에서 물질수지와 에너지 수지를 계산하기는 쉽지 않은데, CPS를 사용하면 간편해진다.

모사의 기본적인 법칙은 실제 세계를 그대로 나타내는 것이다. 생태산업단지를 진행시키기를 주저하는 사람들은 실제로 구성되어있는 생태산업단지가 거의 없다는 것에 초점을 맞추는데, 공정 모사를 통해 만들어진 가상적인 생태산업단지를 통해 문제가 일어나는 상황을 예측할 수 있다. 또한 CPS를 사용하여 다양한 만약의 문제 상황을 평가할 수 있고 실제로 생태산업단지 내에 있는 많은 회사들이 당면한 여러 질문 (예를 들어 순조로운 순환을 위해 추가적인 에너지 공급이 필요한가? 운반비용이 너무 높은가? 회사 X,Y,Z가 연결되었을 때, X가 생산을 늘리기를 원하면 어떻게 되는가? 등)에 대한 답을 찾는 것에 있어서도 쓰일 수 있다.

## 5. 결론

물질과 에너지 순환은 상호간의 필요성을 갖고 있는 회사의 연결하는 것이다. 겉보기엔 간단해 보이지만, 불행히도 단 하나의 회사의 효율적인 설계와 최적 운전에도 많은 난관이 있으며 이런 난관들은 생태산업단지 수준에선 늘어나기만 한다. 시스템 접근을 사용하게 되면 환경적이고 경제적인 이득은 늘어나지만 시스템 안에서 회사 간의 물질과 에너지 사용을 최적화하기 위하여 다양한 상황들이 검토되어야만 하기 때문에 최적 공정을 찾는 것은 어렵다. 그 때 최적점을 실제로 검토하게 되면 비용이 많이 들고 잠재적인 위험이 있는데 이것이 CPS를 통해 해결될 수 있다.

CPS를 사용하면 생태산업단지 안 회사들의 잠재적이고 환경적이고 재정상의 이익을 정량화 할 수 있고, 일반적인 공정 설계 문제를 풀 수 있으며 만약의 문제 상황에서의 결과를 계산할 수 있다. CPS는 환경적인 영향을 줄이기 위한 물질교환망을 설계하고 폐기물 처리를 통합하는 것, 에너지 효율을 극대화시키는 장치 설계와 물질 이용을 절약하는 장치설계 등에 이용될 수 있고 회사들과 생태산업단지 주위의 그들의 공급자, 소비자 간의 연

결에 대한 이득을 평가하고 통합에 대한 검토에 사용될 수 있다. 더 나아가 CPS는 배출 보고서 만들 수 있을 정도로 정교하며, 심지어 공장에 들어가 보지 않는 운전 실무자들을 훈련하는데 쓰일 수 있다. 그러므로 CPS는 에너지와 물질 흐름을 촉진시킬 수 있는 관리 자료에도 유용하게 쓰일 수 있다. 게다가 CPS는 시스템을 개선할 수 있는 새로운 전략, 도구, 기술에 관해 경영진과 직원들을 교육하고 훈련시키는데 도움을 줄 수 있다.