

열병합 증류계의 제어

김 석준, 주은정, 박 선원
한국과학기술원 화학공학과

Controlling the Heat Integrated Distillation Columns

Suk-Joon Kim, En-Jung Joo and Sunwon Park
Dept. of Chem. Eng., KAIST

1. 서론

다중효과(multi-effect)를 이용한 열병합 증류계는 에너지절감에 있어서 경제적인 이득을 주지만, 한편으로 전체 증류탑들이 복잡한 상호연관을 보이므로 조업상의 어려움을 일으킨다. 그 이유는 외부의 영향에 의하여 생긴 공정변화가 열교환기를 통하여 전체 공정으로 확산되고, 이러한 경향이 지속적으로 반복되기 때문이다. 그러므로, 대상공정을 원활히 조업하기 위해서는 공정의 조업성을 증가시키기 위하여 보조 응축기나 보조 재비기가 필요하다. 열교환기를 통하여 대부분의 열량이 공급되지만 일정부분을 보조 응축기나 보조 재비기를 이용하여 제어성을 향상시켜야 한다.

본 연구에서는 열병합 증류계에 대하여 제어전략 및 제어시스템을 개발하고, 동적 모사기를 구성하여 개발된 제어시스템의 제어성능을 알아보는 것이다. 연구 대상공정은 3 개의 증류탑이 순서적으로 연결된 구조를 갖고 있으며, 공정의 정성적인 이해를 위하여 동적 모사기를 구성하였다. 구성된 제어구조와 일반적인 제어구조의 성능을 비교하기 위하여 공정에 유량 변화와 성분변화의 외란이 주어졌을때 제어성능을 산출하였다.

본 연구의 대상공정은 그림 1과 같이 탑1, 탑2, 탑3으로 명명된 3개의 증류탑이 순서적으로 연결된 구조를 갖고 있다. 증류탑은 본 대상공정의 대표적인 특징은 응축기와 재비기를 열교환기로 병합한 것이다. 이러한 열병합은 탑1의 재비기와 탑2의 응축기, 탑2의 재비기와 탑3의 응축기 사이에 구성되어 있다. 또한 탑2의 상하에 보조 응축기와 보조 재비기가 각각 한 개씩 설치 되어있다. 사용되는 물질은 물질A, 물질B, 물질C로 명명하였다.

2. 동적 모사기

동적 모사기는 시간이 흐름에 따라 계가 어떻게 변하는지를 보여주며, 초기 입력은 일반적으로 정상상태 모사기로부터 주어진다. 동적 모사기는 크게 열역학 자료와 공정수식 계산기로 구성된다. 공정모델은 물질수지식과 열수지식 등으로 구성되며 미분방정식으로 표현된다.

증류탑은 온도와 압력에 따라 기체와 액체가 평형을 이루면서 원하는 순도로 분리되는 것이므로 기액 평형 자료가 매우 중요하다. 본 연구에서는 대상물질의 3성분계 평형 자료는 구하기가 쉽지 않아서, 각 증류탑 조업조건을 분석한 결과로부터 각 증류탑을 2성분계 분리 공정으로 가정하고 2성분계 평형으로 문제를 풀었다. 가정 (1): 탑1과 탑2는 물질A와 물질B의 기액평형에 의해 결정된다; 가정 (2): 탑3은 물질A와 물질C의 기액평형에 의해 결정된다.

물질A와 물질B의 기액평형의 열역학적 성질을 예측하기 위하여 Raoult's law를 사용하였으며, 증기압을 구하는데 Lee-Kesler의 식을 이용하였다. 물질A와 물질C는 액상에서 두 물질의 상호인력이 특별히 강하고 Polymerization을 일

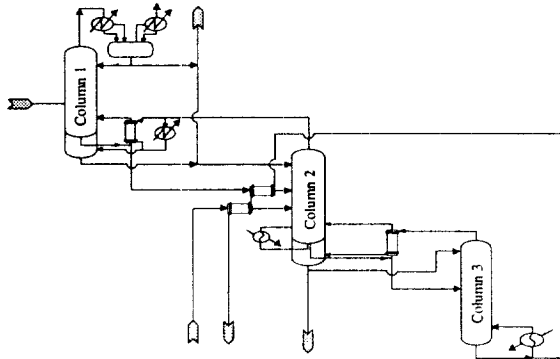


그림 1. 대상공정의 공정도.

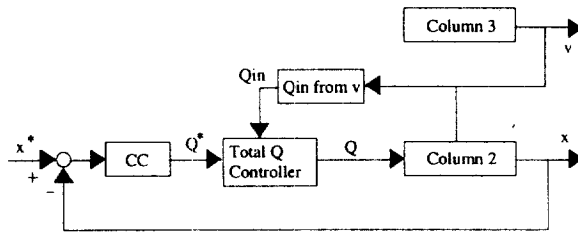


그림 2. 전체 열량 제어의 블록선도.

으키며 공비점을 형성하는 등의 특이한 성질을 많이 포함하여 이러한 일반적인 예측식을 적용할 수가 없으므로, 문헌에 보고된 실험식을 사용하였다.

본 연구에서 사용된 동적 모사기의 알고리즘은 Luyben의 방법[1]을 근거로 하였다. 이 방법을 대상공정에 맞게 개조하였으며 주어진 끓는점을 계산하는 서브루틴을 위에서 언급한 열역학식을 이용하였다.

3. 전체 열량 제어(total heat control : THC)

공정제어에 있어서 조작변수간의 상호간섭을 최소화하여야 각 제어기의 제어 성능을 극대화 할 수 있다. 그런데, 열병합 공정의 경우 어느 한 변수라도 변화하면 이 영향이 전체 공정으로 파급되며, 다른 변수로 전파된 변화가 다시 원래의 변수에 영향을 주게 된다. 이런 경우에 공정의 작은 변화일지라도 다시 설정치로 모든 제어변수를 복귀시키고 안정화시키는 과정이 길어지고 최악의 경우 공정변화가 증폭되어 안전상의 문제를 야기할 수 있다.

여러개의 증류탑이 열병합으로 연결된 경우에는 전체 열량 제어(total heat control: THC)를 사용하여야 한다. THC는 물리적으로 열병합된 시스템에서 생기는 간섭영향을 제어기를 사용하여 전달되는 열량을 제어기법을 이용하여 분리하는 기법이다. THC를 적용하기 위해서는 보조 재비기나 보조 응축기가 필요하다. THC는 그림 2와 같이 cascade 형태의 계층적 제어구조를 갖는다. 보조 재비기를 사용하는 경우에는 먼저 첫번째 증류탑의 탑상 기체 유출의 온도, 조성과 유량으로부터 열교환기에 공급되는 열량(Q_{IN})을 계산한다. 그러면 조성제어기로부터 산출된 필요한 전체 열량(Q_{SP})에서 Q_{IN} 을 뺀 열량 Q 만을 두번째 증류탑의 보조 재비기에서 공급하게 된다. THC를 설치한 경우에는 열교환기를 통한 두

증류탑간의 간섭영향을 제어기를 사용하여 분리하기 때문에 조업의 난이도는 각각의 증류탑을 독립적으로 운전하는 것과 같다.

5. 모사결과

제어구조를 비교하기 위하여 C 탑의 유입에서 유량의 30% 계단과 증가와 물질C 조성의 50% 계단과 증가에 대하여 제어성능을 비교하였다. 이와같은 변화는 실제 조업에서는 일어나지 않는 경우이지만 제어구조간의 제어성능에 대한 명확한 비교를 위하여 사용하였다.

제어기를 설계하기 위하여 공정의 동적모델을 구하였다. 계단과 입력을 공정에 가하고 이에대한 공정 응답을 구하였다. 시간지연과 1차함수로 구성된 선형모델을 사용하여 이 응답들에 대한 공정의 전달함수를 구하였다. 기본적으로 각 증류탑에서 (L/D)V 구조를 사용하였으며, THC의 설치 유무에 대하여 경우를 나누어 성능검사를 수행하였다. (L/D)V 구조에서 각 local loop에는 PI 제어기를 사용하였으며, 제어기의 튜닝은 IMC 튜닝을 사용하였다.

그림 3은 (L/D)V 구조를 사용하고 THC를 사용하지 않았을때 공정 유입의 유량변화에 대한 공정의 응답을 보여준다. 그림 4은 같은 제어구조를 사용하였을때 공정 유입의 조성 변화에 대한 공정의 응답을 보여준다. 그림 5는 (L/D)V 구조를 사용하고 THC를 사용할때 공정 유입의 유량 변화에 대한 공정의 응답을 보여준다. 그림 6은 같은 제어구조를 사용하였을때 공정 유입의 조성 변화에 대한 공정의 응답을 보여준다. 각 그림에서 (a)는 탑1과 탑2의 탑상에서 물질B의 조성변화를 (b)는 탑3의 탑상과 탑저, 그리고 10번째 단에서 물질C의 조성변화를 보여준다.

모사결과로부터 THC를 사용하였을때 외란에 대하여 제어성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 특히 열교환기를 통하여 퍼지는 상호간섭을 차단함으로써 공정의 진동이 줄어들고 설정치로 빨리 복귀함을 알 수 있다.

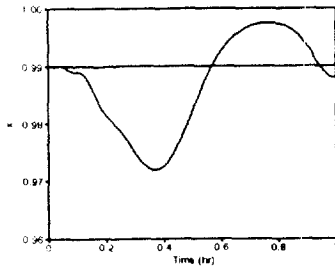
6. 결론

본 연구에서는 열병합 증류계의 제어전략 및 제어시스템을 개발하여 동적모사기를 통하여 제어성능을 검사하였다. 전체 열량 제어기를 도입하여 물리적인 열병합에서 생기는 증류탑간의 상호간섭을 제어기를 사용하여 차단하였으며, 결과적으로 각각의 증류탑 조업의 독립성을 증가하여 제어를 용이하게 하였다.

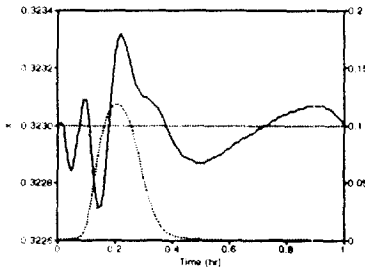
본 연구에서 구성된 제어구조는 기본적인 개념을 간단하게 실공정에 적용할 수 있는 것으로 이를 실공정에 이용하면 조업의 안정성을 꾀하고 생산품의 성분규격을 엄격하게 제어하여 연관된 공정에 많은 이득을 줄 것으로 기대된다.

참고문헌

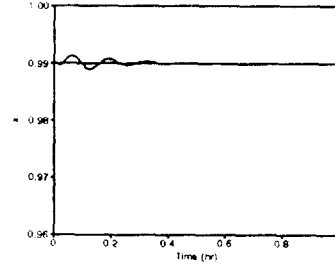
1. Luyben, W. L., Process Modeling, Simulation and Control for Chemical Engineering, McGraw-Hill, 1990.
2. Luyben, W. L., Practical Distillation Control, Van Nostrand Reinhold, 1992
3. Reid, R. C., J. M. Prausnitz and B. E. Poling, "The properties of gases and liquids," McGraw-Hill, 1986.3. Shinsky, F. G., Distillation Control, McGraw-Hill, 1984.
4. Seborg, D. E., T. F. Edgar and D. A. Mellichamp, Process Dynamics and Control, John Wiley and Sons, 1989.
5. Skogestad, S., P. Lundstrom and E. W. Jacobsen, "Selecting the Best Distillation Control Configuration," AIChE JI, Vol 36, No, 5, p753-764, 1990.



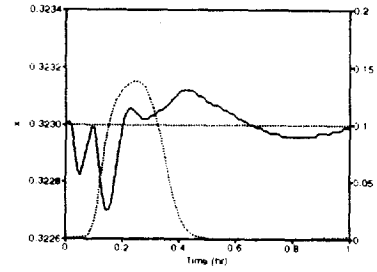
(a)



(b)



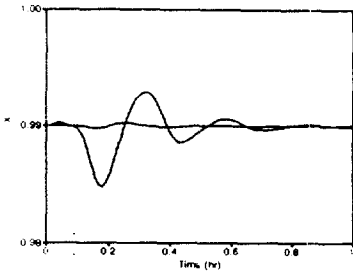
(a)



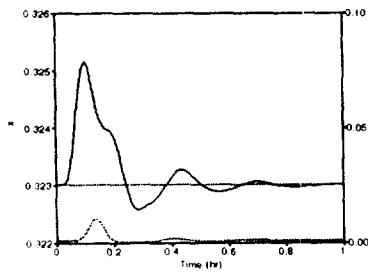
(b)

그림 3. 유량변화에 대한 일반 (L/D)V 구조의 공정응답.

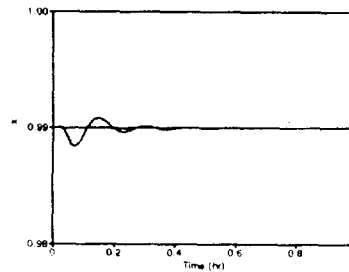
그림 4. 유량변화에 대한 THC를 사용한 공정응답.



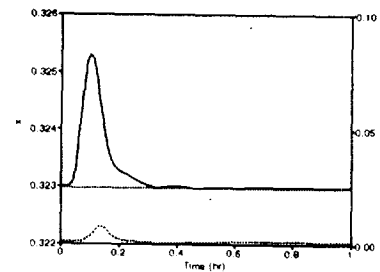
(a)



(b)



(a)



(b)

그림 5. 조성변화에 대한 일반 (L/D)V 구조의 공정응답.

그림 6. 조성변화에 대한 THC를 사용한 공정응답.