

화학공장에서서 공정기술을 이용한 에너지 절감

윤 인 섭

서울대학교 화학공학과

1. 서 론

지난 여름 우리는 하루 최대 전력소비량을 매일 갱신하는 무더위를 겪었다. 이처럼 근래들어 에너지 위기라느니 에너지 고갈이라느니 하는 말이 심심찮게 들릴 정도로 에너지가 부족한 실정이다. 그만큼 에너지의 소비가 늘고 절대량이 부족한 것이다. 이는 인구가 증가하고 생활, 문화가 고급화되면서 소비가 늘었기 때문이지만 기술의 발달이 수요를 따를만큼의 에너지를 공급해주지 못하기 때문이다. 그래서 발전소가 건설되고 있다. 그러나 몇몇 보고서에는 에너지 사용의 효율성이 떨어지기 때문이라는 지적도 있다. 즉 절대량에서는 전혀 부족하지 않으면서도 그것을 낭비하고 제대로 사용하지 못하고 효율적으로 관리하지 못하기 때문에 부족하다고 느끼는 것이다. 이는 산업계에서 더욱 뚜렷이 나타나며 따라서 발달된 과학기술을 이에 적용하면 조금의 노력으로도 에너지의 소비를 줄일 수 있을 뿐만 아니라 그 효율도 높을 수 있으며 이는 원가절감에 상당한 영향을 미치므로 기업의 이윤추구 목적과도 부합한다고 하겠다.

예로부터 대량생산을 목적으로 막대한 에너지를 소비하고 있는 화학공장들로서는 보다 효율적인 에너지의 관리와 사용을 통해서 이 위기상황을 슬기롭게 극복해 나가야 하겠다. 더군다나 요즘의 발

달된 공정기술과 컴퓨터기술로 장치산업의 특성상 전산화가 쉬운 화학공장들로서는 이를 십분 활용하여 그 효과를 극대화시킬 수 있다.

화학공장은 설계에서부터 건설되고 운전되고 그 수명을 다할 때까지 에너지 소비의 효율을 높일 수 있는 많은 기회를 가지고 있다. 발달된 공정기술과 컴퓨터기술을 활용한 에너지 절감방안들을 몇가지 살펴보겠다.

2. 설계시의 에너지 절감

전형적인 화학공장들은 한 스트림으로부터 다른 스트림으로 열을 전달하는데 사용되는 많은 열교환기가 있다. 공정을 통해서 효율적으로 스트림내에서의 열을 이용하는 것은 중요하다. 그러므로 여기에는 다음의 두가지 고려할 점이 존재한다. 첫째는 어떤 순서로 열교환을 시킬 것인가이고 둘째로 얼마나 많은 열교환면적을 가질 것인가이다. 이들 열교환기를 어떻게 배열하면 가장 적은 에너지로 적절한 곳에 적절한 양을 공급할 수 있는가를 다루는 것이 열교환망 합성문제이다. 열교환망 합성은 핀치기술이라하여 열교환기 사이의 온도차를 구하고 이를 바탕으로 최소 유틸리티를 찾는 방법이 있다. 이를 프로그래밍하여 선형계획법이나 혼합된 정수 계획법으로 해를 구하고 있다. 이때에는 배열해야될 열교환기의 수와 그 용량때문에 들어가는 설비비와 연계 되는 에너지 절감사이의 적절한 타협이 이루어진다. 일단 열교환망이 합성되면 최적의 조업조건을 다시 결정하게 되는데 이때에도 단일 열교환기의 최적화문제의 확장으로서 해를 구하게 된다. 예로서 한 화학공정의 설계를 살펴보자. Fig. 1은 톨루엔의 hydrodealkylation 공정을 나타낸 것이다. 톨루엔 원료와 수소원료를 예열하여야 하고 반응기



윤 인 섭

- 1967-1971 서울대 학사
- 1976-1979 Foxboro 연구원
- 1979-1982 MIT에서 P.h.D.
- 1982-1983 ASPEN PLUS사 근무
- 1983-현재 서울대 교수

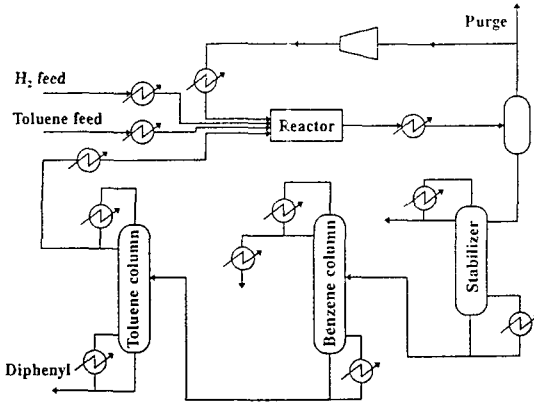


Fig. 1. Hydrodealkylation process.

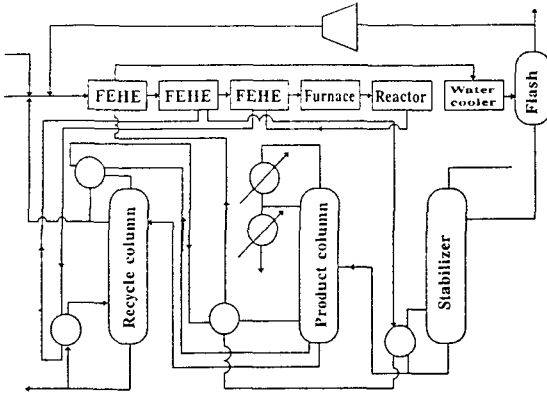
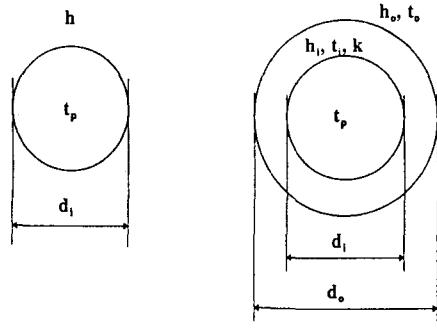


Fig. 2. Energy integration alternative.

에서 나가는 스트림을 상분리가 일어날 수 있도록 냉각시켜야 하며 생산물을 끓는점 이하로 보관하기 위하여 냉각시켜야 한다. 또한 증류탑의 재비기와 응축기에도 가열과 냉각이 필요하다. 열교환망 합성기술을 이용하여 대체가능한 열교환망의 한가지를 Fig. 2에 나타내었다. 이와 같이 열교환망을 재배열한 결과 43%의 에너지 절감효과를 가져왔다.

여러대의 증발기를 설계하는 문제를 보자. 여러대의 증발기를 시리즈로 연결하는 경우 전체 용량은 같은 열면적과 같은 조업조건을 갖는 하나의 증발기보다 크지 않다. 단위 표면적당 기화되는 물의 양은 단일 증발기의 N분의 1이다. 여기서 N은 증발기의 수이다. 게다가 끓는 점의 상승은 각 증발기에서 이용할 수 있는 온도 강하를 줄이는 원인이 되어 용량을 줄이게 된다. 그렇지만 왜 다중 증발기가 효과적일까? 그것은 단위 표면적당 증발기의



$$d_{avg} = LmD = (d_o - d_i) / \ln(d_o / d_i)$$

$$U_{uninsulated} = h$$

$$U_{insulated} = 1 / (d_{avg} / h_i d_i + (d_o - d_i) / 2k + d_{avg} / h_o d_o)$$

Fig. 3. Overall heat-transfer coefficients.

비용이 전체 면적에 따라 감소하여 주어진 생산량을 달성하기 위한 스팀양과 열교환 면적사이의 수치를 계산할 수 있기 때문이다. 물질수지와 에너지 수지식을 포함한 하나 혹은 여러대의 증발기에 대한 정상상태 수학적 모델은 여러 문헌에 나와 있기 때문에 간단한 최적화기법을 사용하여 최적의 증발기수를 구할 수 있다.

열전달 장치를 선택하는데 있어서 가장 중요한 점은 가능하면 높은 총괄 열전달계수 U를 얻는 것이다. 열전달을 제한하기 위해서는 총괄 열전달 계수를 최소로 하여야 한다. Fig. 3은 파이프에서 단열재를 씌운 것과 그렇지 않은 것의 열손실을 계산하는 전형적인 상황을 나타낸다. 장치의 단위 면적당 열손실은 다음과 같은 식에 의해 주어진다.

$$Q = UA(t_p - t_{amb})$$

단열이 되지 않은 파이프나 장치에 대해서 U는 필수적으로 자연대류에 의한 열전달 계수 h와 파이프나 장치의 표면으로부터 복사되는 양과 같다. 단열이라는 말은 열과 에너지 보존과 관련된 가장 일반적인 것이다. 파이프에 단열재를 씌우면 설비비뿐만 아니라 조업비용도 절감시켜 준다. superheated vapor를 운송하는 파이프에서의 단열은 유체를 그 상태로 유지시켜 준다. 스팀의 경우는 응축을 막아주어 보일러에서 발생된 고품질의 스팀을 그대로 사용처에 공급해주게 된다. 냉동기에서도 마찬가지이다. 냉각유체들이 주위로부터 열을 흡수하는 것을 막아주어 냉각시키는데 드는 비용을 줄여준다.

한 예로 4" 파이프에 3"의 calcium silicate 단열재를 입히면 1피트당 약 1260 But/h의 열손실을 막아서 보일러 부하와 사용가능 스팀비용을 약 6% 절약한다고 한다.

이처럼 많은 분야에서 설계단계에서부터 에너지를 절감하고 그 사용을 효율화하는 방안이 있으며 현재 세워지는 모든 공장들은 수학적, 공학적 지식과 기술의 발달, 컴퓨터 기술의 발달로 과거에 50에서 100% 이상의 설계여유를 주던것을 5에서 20% 정도로 줄임으로써 설비비를 줄일 뿐만 아니라 사용되는 에너지의 낭비도 막게 되었다.

따라서 동양최대의 냉각탑을 가지고 있다는 것은 그만큼 에너지를 사용하지 못하고 버리고 있다는 의미에서 자랑할 일이 아니다. 또한 가동율 120%라고 한다면 설계가 그만큼 영성하게 되었다는 것을 의미한다.

3. 운전시의 에너지 절감

공장이 설계되고 건설이 되면 운전을 하여 실제로 제품을 생산하게 된다. 아무리 잘 설계될지라도 실제로 그렇게 운전하지 않는다면 효율적인 에너지의 사용은 달성할 수 없다. 에너지는 실제로 공장을 돌리면서 사용되기 때문에 이 부분에서는 그 방안들이 훨씬 많다고 하겠다. 그렇다면 첫 단추를 잘 끼워야 한다는 말이 있지만 기존에 지어진 공장들은 어떻게 할 것인가? 기왕에 지어진 공장들을 가동하려면 그것도 최적으로 운전할 수 있으려면 보다 많은 노력이 필요하다. 특히 우리나라의 경우에는 설계 기술이 뒤떨어져 있기 때문에 직접 설계는 불가능하다 할지라도 공정해석 능력은 있기 때문에 이를 잘 활용하면 가동율 120%라는 이상한 숫자를 얻을 수 있는 것이다.

연료를 연소시키는 간단한 경우를 생각해 보자. 이는 에너지를 다루는 모든 경우에 해당되며 가장 기초가 될 수 있다. 이론적으로 완전연소를 위한 필요 공기양이 존재한다. 만약 공기의 양을 줄인다면 어떻게 될까? 물론 불완전연소로 인하여 발생하는 열량도 적어질 뿐만 아니라 그늘음으로 인하여 열교환기의 표면이 더러워져서 열교환 효율도 떨어지게 된다. 그렇다면 필요한 양보다 더 많은 양의 공기를 공급하면 어떻게 될까? 그러면 쓸데없이 공기

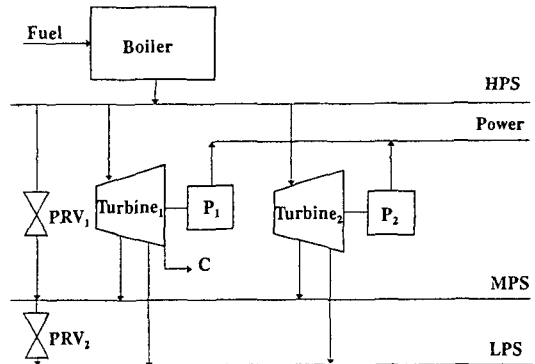


Fig. 4. Boiler/turbogenerator system.

를 가열시킬 뿐만 아니라 굴뚝으로 가까운 돈을 버리는 결과를 낳는다. 실제로 가열로의 효율은 연소후의 물질에서의 산소농도와 폐가스의 온도를 가지고 감시되고 있으며 공기양을 조절하기 위해 댐퍼가 사용된다. 측정장치를 되먹임제어루프와 연결 시킴으로써 실시간으로 연료량과 공기양을 조절하고 있다.

선형프로그래밍 기법이 화학공장의 스팀시스템에서의 조업과 설계에 종종 사용된다. Fig. 4는 스팀과 전력을 생산하는 한 시스템을 보여준다. 전기를 생산하기 위해서 두개의 터보발전기가 있는데 터빈 1은 두가지의 중간 스트림을 가진 이중 추출 터빈이고 터빈 2는 한가지의 중간 스트림을 가진 단일 추출 터빈이다. 첫번째 터빈은 스팀이 응축하면서 방출된 에너지 때문에 더 효율적이지만 두번째 터빈만큼 전력을 생산하지 못한다. 과다스팀은 터빈을 통하지 않고 압력강하밸브를 통하여 두단계의 스팀으로 갈 수 있다. 적절한 스팀양과 전력량을 구하여 필요한 연료양을 줄일 수 있다.

증류탑을 운전하면서 에너지를 절감할 수 있는 방안은 얼마든지 있다. 일반적으로 증류탑을 운전하는데 제약조건으로는 응축기, flooding, 재비기 용량 등이 있을 수 있으며 증류탑은 보통 최대 재순환비에서 운전된다. 그러나 에너지 절약을 위해서는 재순환비를 최소로 하여야 한다. 그렇다면 얼마나 낮추어야 하는가라는 의문이 발생한다. 에너지 절감을 위해서 재순환비를 낮추면 생산물에서 손실이 있기 때문이다. Fig. 5에 그러한 예를 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 에너지 비용이 높을 때의 최적운전조건과 낮을 때의 최적운전조건이 다른 것

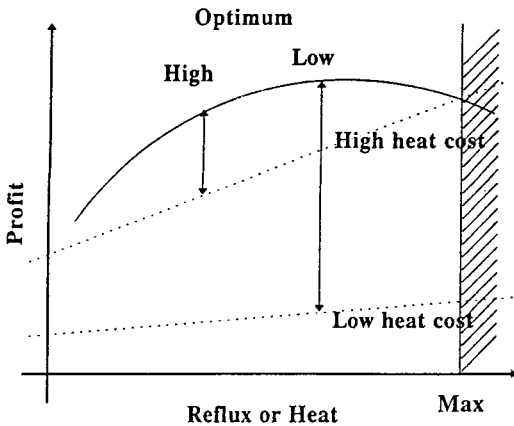


Fig. 5. Optimum reflux ratio.

이다. 그렇지만 운전자들은 품질 사양을 맞추는 범위내에서는 운전하기가 쉬운 높은 재순환비에서 운전하려고 하는 경향이 있으며 많은 증류탑들은 고정된 재순환유량에서 운전되고 있기 때문에 원료 유량이 작을 때에는 필요한 것보다 많이 재순환시키게 된다. 실시간 최적화와 컴퓨터어를 사용하여 최적에서 조업될 수 있도록 이러한 점들은 개선되어야 할 것이다. 증류탑의 조업압력도 또한 중요한 사항중의 하나이다. 조업압력이 낮을수록 에너지가 덜 사용되기 때문이다. 대부분의 증류탑에서 최소 압력은 냉각기 냉각수에 의해 제한된다. 이것은 또한 주어진 분리사양에 대한 재순환비를 최소화하고 상대휘발도를 최대로 한다. 응축기 온도한계를 변화시키면 탑의 압력도 변화된다. 이들을 잘 조절함으로써 에너지소비를 줄일 수 있는 것이다.

FCC(Fluid Catalytic Cracking) 공정에서도 많은 에너지절감의 기회가 주어진다. 일차적으로 중요한 것은 반응기 온도이다. 반응기 온도는 가벼운 성분으로의 전환율을 결정하는 인자이다. 낮은 전환율에서의 산물은 무거우며 가스와 코크의 발생이 줄어든다. 전환율이 증가하면 생산물들은 점차 증가하여 최대 수율을 나타내고 이어서 감소한다. 계절에 따라 어떤 제품을 많이 생산해야 하는가가 달라지는데 공정해석을 통하여 최적 조업온도, 즉 최적 전환율을 결정해야 한다. 원료의 온도는 에너지 수지식에 복잡한 영향을 미치며 또한 수율에도 영향을 미친다. 연소로부터 열을 받아 원료를 가열시키면 연료비가 상당히 많지만 촉매 순환속도를 줄일 수

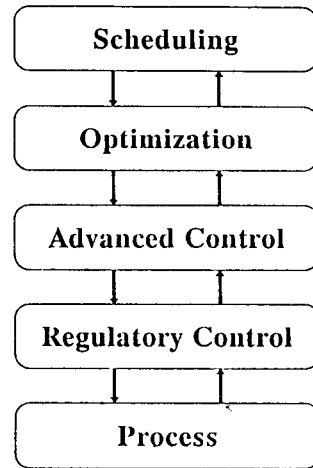


Fig. 6. Hierarchical structure of operation.

있으며 수율을 높이고 따라서 코크의 발생을 줄여서 결과적으로 더 많은 에너지를 절감할 수 있다.

이처럼 잘 설계된 공장이라도 그 운전조건에 따라 에너지 효율을 높일 수 있다. 화학공장은 최적의 상태로 설계되고 건설되었다 할지라도 공정자체가 가지는 비선형성, 불안정성 등과 여러가지 외란으로 인하여 설계시에 계산되었던 최적의 조업조건은 상황에 따라 달라지게 되어 실제로 최적의 상태로 운전되고 있지 못하다. 이를 개선하고자 하는 노력들이 꾸준히 있어 왔는데 가장 대표적인 것이 실시간 최적화이다. 그 방법을 간단하게 설명하면 먼저 공장으로부터 얻을 수 있는 여러가지 정보로부터 현재의 공장상태를 확인하고 더 나은 조업조건을 컴퓨터를 사용하여 찾게 된다. 최적의 조업조건이 결정되면 제어제로 그 설정치를 내려보내 공장이 더 나은 조업조건에서 운전되도록 한다. 이러한 최적화로 인하여 3% 내외의 에너지 절감효과를 얻을 수 있다고 한다. 이는 컴퓨터의 발달과 최적화 알고리즘의 발달로 인해 실현가능하게 되었다. 최근에 증류공정이 에너지의 대량 소비공정이기 때문에 에너지 절감을 위한 노력의 일환으로 실시간 최적화가 많은 관심을 받고 있다.

그러나 이러한 문제들은 모두 제품 사양을 맞추어야 하는 문제와 연관되기 때문에 좀더 확실하고 안정되게 제어할 수 있어야 하는 기술적인 문제에 부딪힌다. 전통적인 제어방법으로 비례적분미분제어를 사용하였는데 디지털 제어시스템이 도입되고

Table 1. Example of scheduling problems.

1. Catalytic Reformer
Reactor regeneration frequency
Catalyst replacement frequency
2. Heat Exchangers
Cleaning frequency
3. Furnaces
Decoking frequency
4. Filters
Decaking frequency
5. Batch Reactors
Sequencing

이에 따라 새로운 제어알고리즘이 등장하여 공장을 보다 안정한 상태에서 조업할 수 있게 할 뿐만 아니라 운전자가 원하는 상태로 운전할 수 있게 됨으로써 명실상부한 컴퓨터에 의한 전 공장의 자동화가 실현되게 되었다. Fig. 6에 화학공장의 조업과 관련된 계층적 구조를 나타내었다. 각 층은 각각의 최적화를 수행하는데 짧게는 초단위에서 길게는 월단위로 적절한 조업조건을 계산하여 조업하도록 하고 있다.

4. 보수/유지시의 에너지 절감

공장을 설계하고 운전하는 부분 이외에 공장을 보수하고 유지하는데에서도 에너지절감방안을 찾을 수 있다. 정유시설은 모든 석유정제의 시작이다. 증류탑의 중간부분에 재순환을 시키면 열회수율을 높여서 연료를 절감할 수 있다.

화학공장에는 주기적으로 조업하는 것이 많다. 이들은 정기적으로 보수작업을 하여야 하는데 보수비용이 들어갈수록 공정의 성능은 향상된다. 몇가지 예를 살펴보자. 반응기의 촉매는 일정기간이 지나면 그 활성이 떨어져서 전환율이 낮아지게 되어 조업 성능이 떨어지게 된다. 적절한 촉매재생시기를 예측하고 실행함으로써 좋은 활성으로 조업할 수 있도록 해준다. 이들은 컴퓨터로 계속해서 공장의 상태를 파악하고 체크함으로써 보수유지의 기간을 예

측해 줌으로써 에너지 효율의 극대화를 꾀할 수 있다. 열교환기에서도 마찬가지이다. 열교환기가 더러워짐에 따라 열회수율은 떨어지고 따라서 적절한 청소시기를 알려줌으로써 최적운전을 할 수 있게 해준다. 그밖에 연소로의 그을음제거와 필터의 청소도 마찬가지이다. 이와 같은 예들을 Table 1에 나타내었다. 이러한 것들은 최근에 각광을 받고 있는 인공지능을 이용한 전문가 시스템을 통해서 많이 이루어지고 있다. 공장으로부터 얻을 수 있는 여러 가지 센서값들을 해석하고 전문가가 가지고 있는 공정시식들을 이용하여 현재상태를 파악하고 교체시기를 계산해 주는 것이다. 이러한 기능은 수학적으로 그 표현이 불가능하거나 어려운 부분까지도 체계적으로 처리해 준다는 면에서 기존의 수학적인 방법들과는 그 성격이 다른데 이것도 또한 공정기술과 컴퓨터 기술의 도움이 아닐 수 없다.

5. 결 론

이와같이 많은 화학공장들은 설계에서부터 운전까지 공장으로서 탄생되었을 때부터 수명을 다할때까지 에너지절약의 기회가 충분히 있음을 알 수 있다. 우리나라의 화학공장은 오래된 것들은 20여년의 기간을 운전한 것도 있고 지금 짓고 있는 것도 있다. 새롭게 설계하는 공장이라면 에너지 절약의 측면에서 다시 한번 검토해서 첫단추부터 잘 끼울 수 있도록 해야 할 것이고 이미 세워진 공장이라면 에너지 소비를 줄이는 조업조건들을 찾도록 노력해야 할 것이다. 학계에서는 이러한 신기술을 적극적으로 소개하고 그 타당성을 입증하여 기업이 받아들일 수 있도록 노력해야 할 것이고 공장에서는 제품의 사양과 생산량만을 맞추려는 안일한 태도에서 벗어나서 이러한 신기술을 적극적으로 검토하고 보완함으로써 에너지효율을 극대화하도록 노력해야 할 것이다. 또한 산업체의 연구소에서는 학계와 공장사이의 차이를 잘 연결시켜줌으로써 우리 모두가 슬기롭게 에너지위기를 극복할 뿐만 아니라 국제경쟁력에서도 뒤지지 않는 좋은 제품을 공급할 수 있도록 하여야겠다.