



## 에너지 소비절약과 제어에 관한 고찰

이 원 규  
한 국 과 학 원

### A Review of Energy Conservation and Control

Won-Kyoo Lee

*Korea Advanced Institute of Science, Seoul 132, Korea*

#### 요 약

에너지 소비절약과 제어에 관하여 재 검토 하였다. 특히 열역학 제 2의 법칙은 비가역성과 유용한 일의 손실을 연관시켜서 대부분의 제어계가 어떻게 에너지를 비효율적으로 사용하고 있는나를 보여 주고 있다. 오늘날 사용되고 있는 제어계는 혼합(Blending), Throttling 그리고 열전달에서의 과다한 온도차를 이용하여 비가역성을 높혀주므로써 에너지를 소비하고 있다. 이러한 제어 방법들이 어떻게 해서 에너지를 비효율적으로 사용하게 하며 에너지 소비 절약을 위해서 어떻게 향상시킬 수 있는지를 분석 고찰하였으며, 밸브 위치제어(Valve Position Control)라는 새로운 개념을 소개하여 검토하고 어떻게 실제로 응용할 수 있는지를 취급하였다.

#### Abstract

Energy conservation and control are reviewed. By equating irreversibility and loss in available work, the second law of thermodynamics shows how most control systems contribute to inefficient use of energy. The commonly-used control practices waste energy through the irreversible operations of blending, throttling and excessive temperature differential across heat transfer surfaces. These control practices are examined with special focus on their contribution to inefficient use of energy and their possible modifications for energy conservation. The new concept of a valve position controller is introduced and discussed with its possible applications.

## 1. 서 론

에너지 관련연구는 에너지 정책에 관한 연구 분야와 에너지 관련 기술의 연구분야로 대별할 수 있고, 그중 에너지 기술연구는 다시 둘로 나눌 수 있는데 그 하나는 에너지원의 개발, 정제 및 전환이고 다른 하나는 에너지 소비 절약에 관한 연구라 하겠다<sup>1)</sup>. 에너지 소비절약 연구도 다시 세분화하면 에너지 절약형 공정개발, 폐열이용 및 폐품 재이용, 단열, 보온, 보냉, 열기기의 효율향상, 열병합 발전, 열 공동이용 시스템 개발 등등을 들 수 있겠다. 1973년 석유 파동 이후 에너지 소비절약을 위해서 미국의 많은 석유 및 화학공장들은 보일러의 연소 효율을 향상시키기 위해 산소분석기를 사용하여 연료와 공기의 혼합비율을 재조정하는 제어 방법을 이용했고, 증류탑에서는 Feedforward 제어를 더 많이 이용하게 되었으며, 전산기(Computer)의 기술 급성장으로 에너지 관리에 Computer가 많이 이용되어 에너지 소비를 최적화하는데 큰 도움을 주고 있다. 에너지 절약형 공정 개발도 활발해져서 열펌프 이용, 열공동이용 시스템 개발로서 공정들 상호간의 연관이 많아져서 공정제어가 힘들 정도까지 되었으며, 열병합 발전을 지향하는 학자들도 많아졌고, 필자가 미국을 떠나기 전 (1978년 8월)에는 미국의 세 회사(Monsanto, Union Carbide, Amoco)가 합작하여 세 회사의 공장이 있는 텍사스주 어느 도시에 "CAM"이라는 이름 아래 열병합 발전소를 건설키로 했다.

이와 같이 에너지 소비 절약 연구에 있어서 주로 에너지 소비 절약형 공정 개발 및 폐열, 폐물 이용등에 관한 연구는 많이 행해졌지만 공정 제어를 에너지 소비 절약이라는 점에서 고찰하고 연구한 예는 흔하지 않으며, 또 있어도 이론적으로 체계적이지 못되어서 공정제어 기술개발에 어떠한 방향도 제시해 주지 못하고 있다. 1975년 Shinskey<sup>2)</sup>는 Depropanizer에 Floating Pressure Control이라는 새로운 개념을 응용한 이후 열역학 제2의 법칙을 공정제어에 적용하여 오늘날 사용되고 있는 대부분의 제어 시스템은

공정의 비가역성을 증가시켜 에너지를 소비하고 있다고 서술했으며 열역학 제2의 법칙을 이용하여 제어기를 에너지면에서 분석 검토할 수 있으며, 에너지 소비 절약을 위해서 제어기를 향상시킬 수 있다고 했다. (필자가 미국 몬산토(Monsanto)회사에 근무중, 에너지 소비 절약과 제어라는 과제를 맡아서 연구했고 여러 논문잡지에 실린 논문을 검토해 본 결과 Shinskey의 고안이 가장 합리적이라는 결론을 얻게 되었다. 이러한 개념은 Monsanto 회사 Engineering Dept.의 Process Engineer 들을 재교육하는데 사용되기도 하였다.) 이 개념은 새로운 것이어서 아직 응용이 많이 되지 못하고 있지만 반응이 좋기에 여기 화학공학 회지에 다시 소개하여 우리나라 화학 및 석유 화학 공장에서의 에너지 소비 절약을 위한 공정제어 향상에 도움이 되었으면 한다.

## 2. 열역학과 에너지 소비절약

열역학 제1법칙에 의하면 에너지는 자연적으로 보존이 된다고 하는데 "우리는 왜 에너지가 모자란다고 하느냐"라는 질문을 할 수 있겠다. 여기에 대한 답은 열역학 제2의 법칙으로 설명할 수 있다. Fig. 1에 도시한 화석연료를 사용하는 발전소에서는 연료를 수증기로 바꾸는 효율이 90% 이어서 에너지의 10% 정도가 굴뚝(Stack)을 통해서 손실되고 있다. 반면 이 발전소에서 열을 일로 바꾸어 주는 Turbine-generator의 열역학적 효율은 38%에 지나지 않는다. 그렇다면 나머지 에너지는 어떻게 되었느냐라는 질문을 할 수 있겠다. 나머지 에너지는 수냉식 응축기에서 배출수증기(Exhaust Steam)로 없어지고 있다. 이 동력 공장에서 에너지 소비를 절감하는 방법은 열역학 제1법칙에 의하면 Stack으로 부터 열 손실을 줄여야 한다는 것 이외에는 어떠한 방법도 제시해 주지 못하는 반면 열역학 제2의 법칙을 적용하면 터빈에서 배출되는 수증기를 가정이나 건물 난방에 사용하는 것이 에너지 소비 절약에 바람직하다고 할 수 있겠다.

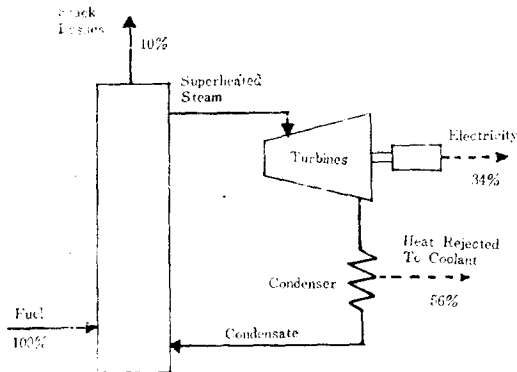


Fig. 1. Energy Conversion Efficiencies in a Power Plant

열역학 제 2의 법칙을 여러가지로 서술할 수 있지만 그중에서도 “일은 열로 이론적으로는 완전히 전환될 수 있지만 열은 그 일부만 일로 전환될 수 있다.”라고 서술할 수 있겠다. 에너지에는 두 종류의 형태가 있는데 하나는 “열”이고 다른 하나는 “일”이다. “일”은 “열”보다 질이 좋은 에너지다. 그 이유는 에너지의 가치는 양에도 관계가 되지만 대부분 질에 더 관계되는데 에너지의 질은 그 에너지로 부터 얼마만한 일을 추출해서 사용할 수 있는가에 따라 정해진다. 그 예로는 252Kcal의 전기(0.29K-watt-hrs)를 이론적으로는 모두 일로 바꿀 수 있지만 반면에 17kg/cm<sup>2</sup>gage(1,700kPa) 수증기의 252kcal는 최대 84kcal에 해당되는 일로 전환될 수 있고 대기압 수증기의 252kcal는 최대 45kcal에 해당되는 일로 바꿀 수 있다. 이런 점에서 볼 때 전기는 될 수 있는 한 모터를 돌리는 데 사용되어야 하며 열로 바꾸어서 사용하면 열역학적 효율을 저하시키는 일이 되겠다. 에너지로부터 추출해서 사용할 수 있는 일의 양을 고려해서 다시 열역학 제 2의 법칙을 서술하면 “에너지가 한 계(System)에서 다른 계(System)로 전달될 때, 또는 그 형태를 바꿀 때, 유용한 일로 바꿀 수 있는 능력이 감소된다.”라고 할 수 있겠다.

에너지 소비 절약을 위해서 서술한 열역학 제 2의 법칙을 적용하면 유용한 일의 소비 절약과 같은 뜻이 되겠다. Smith<sup>3)</sup>는 최대 추출해 낼

수 있는 유용한 일을 다음과 같이 표시했다.

$$W_a = T_0 \Delta S - \Delta H \quad (1)$$

위의 (1)식은 유용한 일을 최대 추출하기 위해서는 엔트로피 변화를 최소화해야 한다고 말해주고 있다. 즉 엔트로피 변화는 공정의 비가역성 척도이기 때문에 에너지를 가장 유용하게 즉 유용한 일을 최대화하기 위해서는 공정의 엔트로피 증가를 최소화하여 비가역성을 최소화해야 한다.

### 3. 제어와 비가역성

오늘날 사용되고 있는 대부분의 제어시스템들은 Blending, Throttling, 열전달에서 과다한 온도차이(Excessive  $\Delta T$ )를 통해 공정의 비가역성을 높혀 공정제어를 하고 있다. 이 세가지 비가역성 공정제어 방법을 여기 다시 각각 분석 검토하여 어떻게 비가역성을 높혀주며 에너지 소비 절약을 위해서 어떻게 향상시킬 수 있는지를 논해 보고자 한다.

#### 3-1. 혼합(Blending)

혼합은 품질관리나 온도제어에 있어서 응답(Response)이 빠르고 예측할 수 있기 때문에 사용되고 있지만 이 혼합은 엔트로피 변화를 증가시킬 뿐만 아니라 물질의 가치도 저하시켜 주고 있다.

#### 가) 품질관리를 위한 혼합(Blending for Quality Control)

증류와 같은 분리공정에 있어서 물질수지나 에너지 수지로 생산 물질의 성분을 제어하는 것은 쉽지가 않다. 그러한 반면에 혼합에 의한 품질 제어는 응답(Response)이 좋으며 예측할 수 있기 때문에 품질이 좋은 것과 나쁜 것을 혼합해서 품질관리를 하려는 경향이 많지만 엔트로피 변화를 증가시켜 에너지 소비가 많다. 그 예로서 99% 순수한 생산품을 제조하기 위해서는 90% 순수한 생산품 제조에 사용되는 에너지의 2배가 필요하고 94.5% 순수한 생산품을 직접 분리공정에서 제조할 때 보다 19.5% 에너지가 더

많이 소비된다.” 분리공정에서 혼합은 Bypassing 이나 Recycling 의 형태로도 나타나고 있다.

Recycle 의 예를 Fig. 2에 도시했다. Fig. 2에서 보는 바와 같은 4개의 증류탑에서 Overhead Products를 혼합하여 첫번째 증류탑에 Recycle 하는 공정을 열역학 효율을 높이기 위하여 분석 검토해 본 결과 두 개의 증류탑을 제거시킬 수 있었고 단하나의 혼합만 사용할 수 있었으며 이렇게 Recycle 을 제거시킴으로써 공정을 변경하기 전에 사용되었던 에너지 소모량의 67%를 절약할 수 있었다<sup>5)</sup>. Recycle 을 제거한 공정은 Fig. 3에 도시하였다.

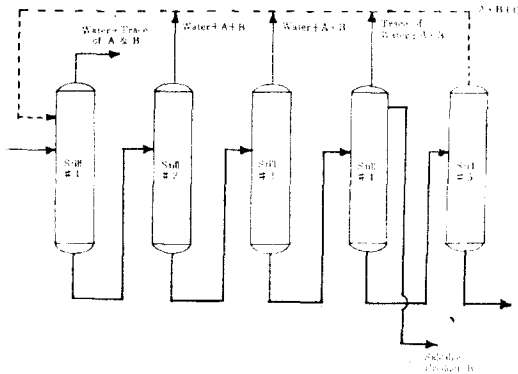


Fig. 2. Old Systems

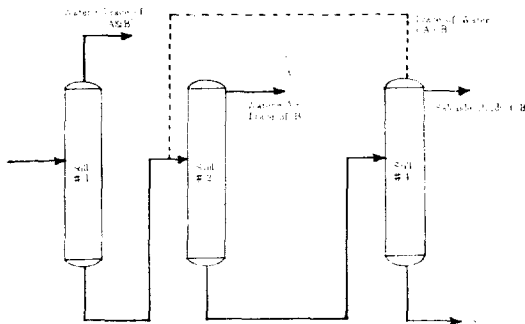


Fig. 3. Revised Systems

품질관리에 있어서 Blending, Bypassing, Recycling 은 에너지 소비 절약을 위해서 될 수 있는 한 이용하지 말아야 하며 빠른 응답(Fast Response)이 필요하다면 Feedforward 나 다른

Advanced Control Technique 을 사용하는 게 바람직하다고 하겠다. 품질관리에서 혼합이 꼭 필요하다면 다음과 같은 사항을 명심해야 한다.

- ① 품질이 거의 비슷한 것을 혼합할 때 유용한 일의 손실이 적다.
- ② 병행공정 단위에서의 생산물질을 혼합할 때는 별로 손실이 없다.
- ③ Bypassing 은 엔트로피를 상당히 증가시킨다.
- ④ Recycling 은 분리에 사용된 일을 헛되게 한다.
- ⑤ 생산품의 품질이 Cycling 할 때 엔트로피 변화는 Cycle 의 진폭에 비례해서 증가한다.

#### 나) 온도제어를 위한 혼합(Blending for Temperature Control)

가정에서나 산업공정제어에서 온도제어를 위해 가장 흔히 사용되는 방법은 Fig. 4에서와 같이 찬 것과 더운 것을 혼합하는 것이다. 이 제어방법은 연료를 직접 조절해서 온도를 제어하는 것보다 응답이 좋지만 상당한 에너지 비용을 치루어야 한다. Fig. 4에 도시한 제어시스템에서는 가열기(Heater)를 통하는 유체는 사용자가 필요로 하는 양보다 적고 그 온도도 높다. 높은 유체 온도를 유지하기에 필요한 열전달을 위해서는 가열관의 온도도 높아져야 한다. 동시에 가열기의 유체량이 적기 때문에 열전달 계수도 저하되어 더 높은 가열관의 온도가 필요하게 된다. 결과적으로 연료는 이 두 온도제어기의 온도 설정치(Set Point) 차이에 비례해서 증가한다. 이 예에서와 같이 혼합에 의해 일어난 엔트로피 증가는 Bypassing 을에 비례하며 연료 증가는 엔트로피 증가율보다 높다. 필자가 Therminol이라는 열 매개체를 38°C에서 205°C까지 가열하는 경우를 계산해 본 결과 40%의 Therminol을 Bypassing 했을 경우 엔트로피 증가는 10.75%였고 연료 증가는 17%였다.

온도제어에 있어서도 혼합에 의해서 응답이 좋은 제어를 할 수 있지만 에너지 소비 절약을 위해서는 다른 제어 방법을 사용해야겠다. 위의 예에서 연료 변화에 따른 Flue Gas 온도의 응답이 빠르기 때문에 이점을 고려해서 Cascade Control을 Fig. 5와 같이 사용하면 응답도 좋고 에너지 소비 절약도 할 수 있겠다.

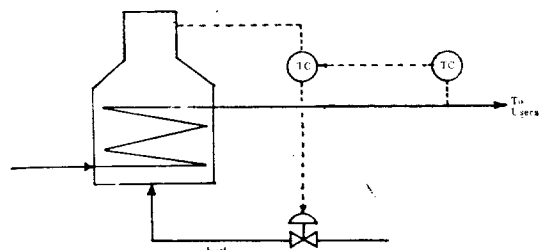


Fig. 4. Bypassing Heater for Temperature Control

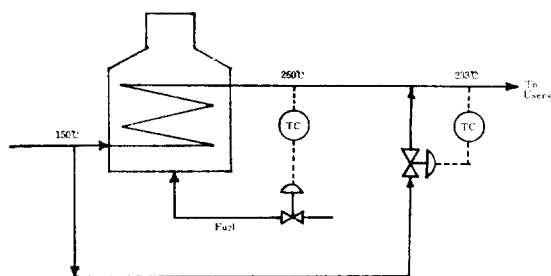


Fig. 5. Energy-Efficient Heater Temperature Control

다) 기 타

혼합이나 Bypassing 은 온도제어나 품질관리 외에도 사용되는 경우가 있다. Fig. 6에 도시한 제어시스템에서 Bypassing 을 제거시켜 상당한 에너지 소비 절약을 할 수 있었다<sup>6)</sup>. Fig. 6는 석유화학 공장에서 원유를 냉각시키기 위한 Box Cooler 인데 Box Cooler 에서 나온 더운물의 일부를 원심펌프(Centrifugal Pump)를 사용해서 Cooling Tower 의 찬물과 혼합시키는 예이다. 여기에 사용된 Bypassing 은 이 Box 의 액위 조절을 위한 것이며, 이 경우 원심력 Pump 는 Pump 곡선의 맨 끝에서 작동되기 때문에 모터가 필요로 하는 마력수는 최대가 되어 전기소모가 막대하다. 액위조절을 Fig. 7에서와 같이 Split Range 제어기를 사용해서 하면 정상운전에서 Bypassing 을 제거할 수 있고 Pump 양이 적어져서 전기모터가 필요로 하는 마력수도 적게 된다. 모터의 평균 마력은 최대 펌프 마력의 70%로 줄일 수 있었다.

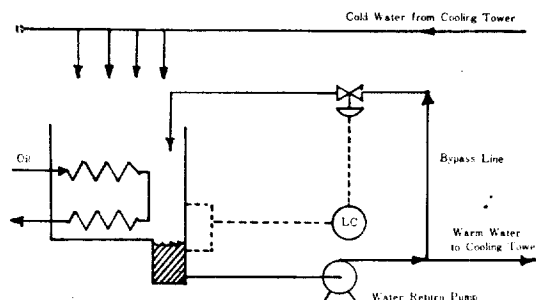


Fig. 6. Pumping Water to a Box Cooler

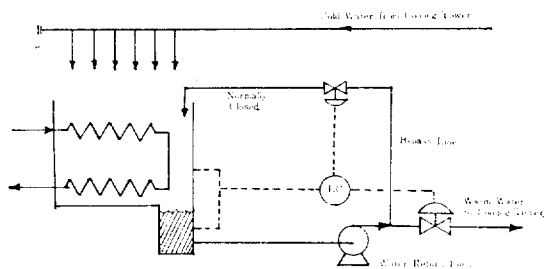


Fig. 7. Reduce Cooling Water Bypass

### 3-2. 열전달(Heat Transfer)

열전달 속도(Heat Transfer Rate)는 Fig. 8에 도시한 것과 같이 보통 ① Bypassing ② Throttling ③ Flooding with condensate ④ Blanketing with noncondensable 등에 의해서 제어되고 있으며, 이러한 제어제들은 열전달 표면에서 온도차를 높혀 주므로써 열전달속도를 제어하고 있다. 반면 유용한 일은 이 온도차에 비례해서 손실되고 있으며 이 관계를 수학적으로 표시하면 다음과 같다.

$$W = Q \Delta T / T_0 \quad (2)$$

(2)식에 의하면 온도 차가 없어질 때  $Q$ 라는 열전달에서 생기는 일 손실도 없어진다고 할 수 있다.

열전달 표면에서 온도 차를 줄이기 위해서는 열전달 면적과 계수를 증가시켜야 하는데 그렇게 하면 일손실을 감소시키기 위한 자본투자가 너무 커지겠고 아니면 많은 Pumping 에너지가 소모된다. 열교환기설계에 있어서 어떤 설정된 열전달을 위해 열전달 면적을 가장 나쁜 조건에서

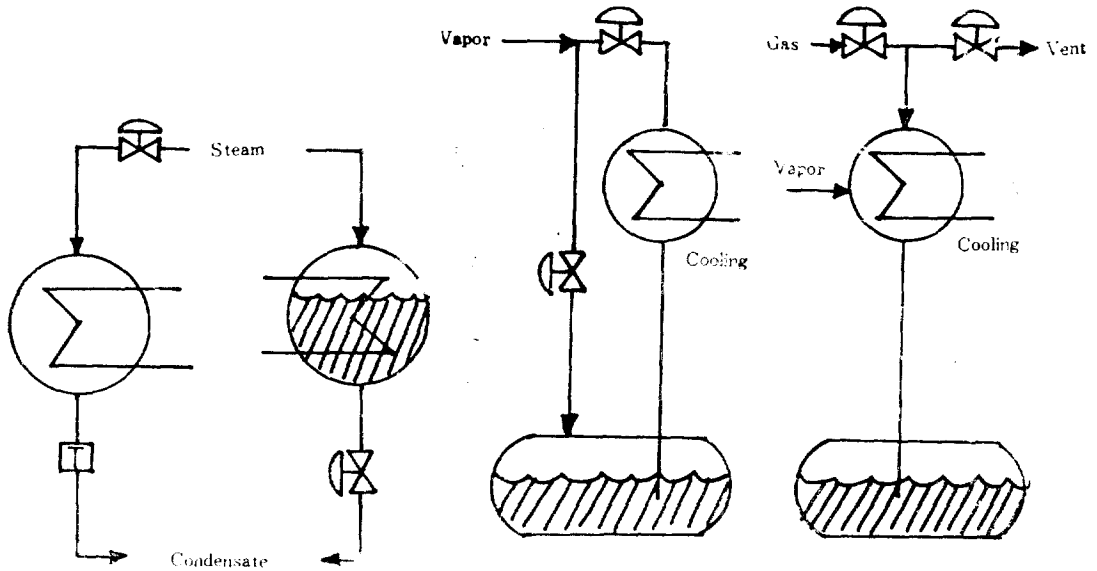


Fig. 8. Heat Transfer Rate Control

제산하고, 더욱이 대부분의 공장들은 최대량 (Maximum Production)의 생산조건 아래서 운영되고 있지 않기 때문에 열교환기에서 열전달 속도를 감소시키기 위해, 위에 열거한 제어방법을 사용하고 있다.

다. 좀 더 자세히 설명하면 냉각기의 액위는 공정의 온도 제어기에 의해서 열전달속도에 따라 변하게 되어 있으며 냉동제는 냉각기의 압력이 일정하게 유지되므로써 일정한 온도에서 끓게 된다. 냉각기에 공급되는 냉동제의 온도는 외부온도의 영향을 제거시키기 위하여 Condenser의 Louver에 의해 제어되고 있다. 만약 냉각기의 액위를 모든 열교환관(Heat Exchanger Tubes)들이 잠기도록 항상 일정하게 유지한다면 냉각

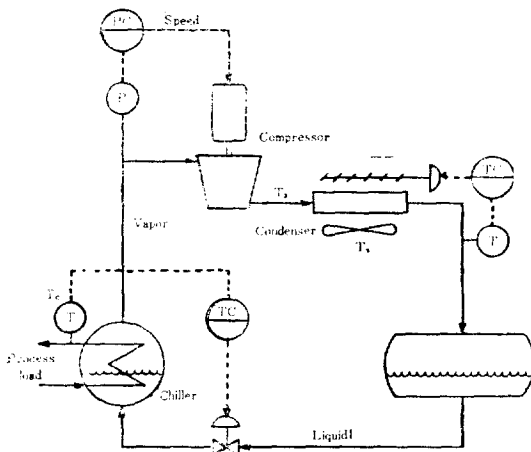


Fig. 9. Conventional Refrigeration Control Loops

Fig. 9에는 보통 사용되고 있는 냉동기의 제어시스템을 도시했다. 여기서 냉동기는 세개의 독립된 회로(Loop)로 제어되고 있어 열펌프(Heat Pump) Cycle이 비능률적으로 운영되고 있

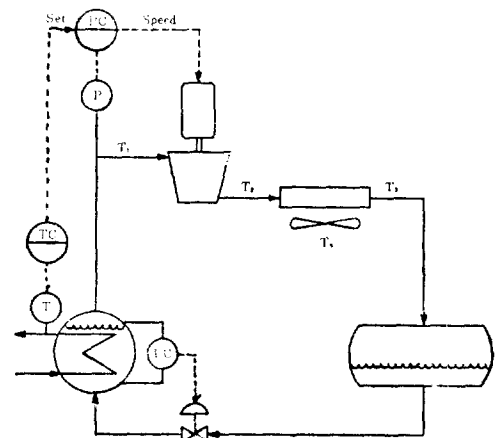


Fig. 10. Energy-Efficient Refrigeration Control Loops

기의 냉동제 온도를 최대화 할 수 있으며 압축기의 흡입 압력도 높힐 수 있다. Fan Condenser의 Louver를 항상 완전히 열어 두므로써 열전달 Load가 저하되거나 또는 외부의 온도가 저하될 때 압축기의 배출압력을 줄여줄 수 있다<sup>7)</sup>. 이 두 가지 효과를 이용한 제어제를 Fig. 10에 도시했다.

증류탑 압력제어에 Flooded Condenser가 많이 사용되고 있는데 Depropanizer의 경우 Flooded Condenser를 제거하여 입력제어제를 변경하므로써 상당한 에너지 소비 절약을 할 수 있었다<sup>5)</sup>. 이때 물의 속도가 낮을 경우 응축기의 물쪽에 더러운 물질이 끼는 불리한 점도 있겠다. Depropanizer의 Feed를 위한 응축기와 분리기에 있어서도 응축기를 Bypass 해서 분리기 드럼(Drum)의 액위를 제어하는 대신 Bypass를 제거하여 제어시스템을 변경하므로써 압축기에 필요한 수증기를 많이 절약할 수 있었다<sup>6)</sup>.

### 3-3. Throttling

거의 예의없이 대부분의 공정들은 제어밸브나 댐퍼(Damper)를 Throttling 해서 제어되고 있다. 밸브를 Throttling 할 때 에너지가 직접 흡수되거나 배출되지는 않지만 일이 열로 바뀌어 지고 있다.

포화수증기는 조절기(Regulator)나 제어밸브를 통해서 팽창할 때 그 압력이 저하되며 과열수증기로 변하는데, 이 과열 수증기는 열전달 매개체로서 효과적이 못된다. 반면에 수증기가 터빈을 통해서 팽창하면 유용한 일을 생산할 수 있고 또 배출수증기는 원래의 수증기보다 더 포화된 상태에서 습하기는 하지만 가열하는데 더 유용하게 사용될 수 있다. 제어밸브에서 일어나는 압력감소로 부터 일을 추출해 낼 수 있다면 가장 이상적이겠지만 현재 기술로서는 어렵고 또 경제성도 없으며 더욱이 대부분의 경우 압력감소가 적기 때문에 제어밸브에서 생기는 압력감소를 최소화 하거나 제어제를 설계하거나 제어밸브를 선택하는 것이 중요한 일이다.

#### 가) 제어밸브 크기선정 및 선택

과거에는 제어밸브의 크기를 정하는데 있어서

유체의 흐름이 없을 때 시스템의 압력감소의 25% 내지 50%에서 최대의 유체가 흐를 수 있도록 했다. 이러한 재래식 방법으로 정해진 제어밸브로 만족스러운 제어를 할 수 있었으며 밸브의 원래 특성 및 Rangeability를 보존시킬 수도 있었지만 에너지 소비가 많아서 재고려할 필요가 있다. 시스템 압력감소의 5% 내지 10%에서 최대의 유체가 흐를 수 있도록 해도 제어성을 잃지 않고 만족스러운 제어를 할 수 있겠다.<sup>8)</sup> 특히 Buchwald<sup>9)</sup>는 이러한 점을 정량적으로 Digital Simulation을 통해서 Sensitivity와 Valve Gain을 분석검토한 결과 시스템 압력감소의 10%이던 제어성도 잃지 않으며 더욱이 에너지 소비 절약까지 할 수 있겠다고 했다. 최대 유체양에서 이용할 수 있는 압력감소가 10%정도일 때 본래 선형특성을 가진 제어밸브는 설치되었을 때 비선형을 보이고, Equal-percentage 특성을 가진 제어밸브는 선형성을 보이기 때문에 최소의 압력 감소를 위해선 Equal-percentage 밸브를 사용해야 하며 크기는 한 단위쯤 더 큰 밸브를 선택해야 한다. Fig. 11과 12에 위의 특성을 도시했다. 한편 밸브의 본래 Rangeability가 압력감소 비율의 square root 만큼 저하되지만 Equal-percentage 밸브는 50:1이라는 큰 Rangeability를 갖고 있어서 최대의 유체흐름에서 다만 10%의 압력감소를 허용한다 해도 Rangeability는

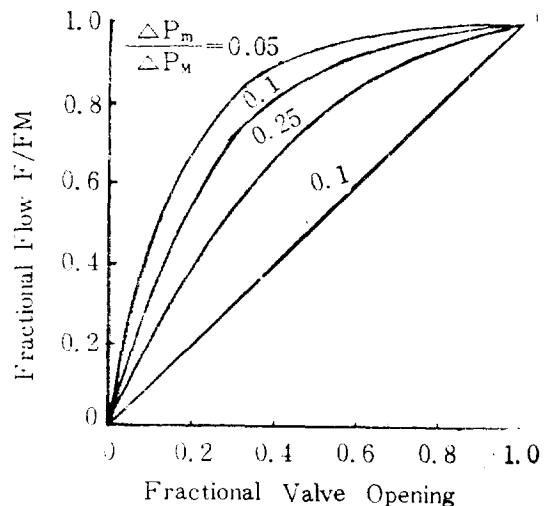


Fig. 11. Installed Characteristic of Linear Valve

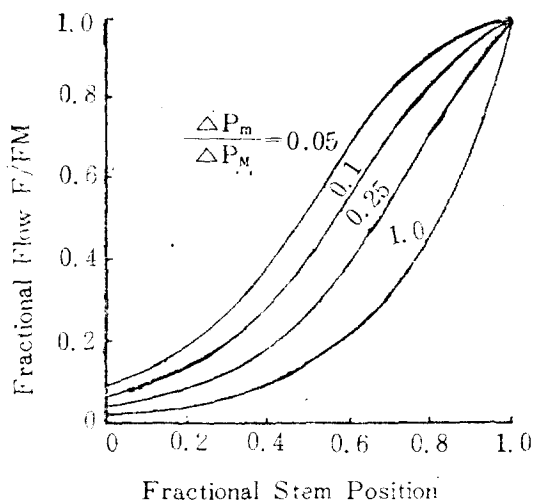


Fig. 12. Installed Characteristic of Equal-Percentage Valve with a Rangeability of 50.

16:1로 줄어든다. 보통 공정에서 요구되는 Rangeability는 5:1이기 때문에 10% 압력감소로 인해서 줄어든 16:1이라는 Rangeability도 제어에는 충분하다고 할 수 있겠다.

위의 새로운 방법으로 크기를 정한 제어밸브를 사용해서 에너지 소비 절약을 하려면 주 발동기(Prime Mover) 크기 선택도 제어밸브와 같이 동시에 정해져야 한다. 만약 펌프가 너무 크다면 여기에 관계된 제어밸브에서 생기는 압력감소도 너무 커져서 큰 제어밸브를 사용한다 해도 에너지 소비 절약을 할 수 없게 된다. 이 경우에는 펌프의 Impeller를 바꾸거나 작아내야 한다.

#### 나) 제어밸브의 운영

액상계(Liquid Phase System)에 있어서 제어밸브를 통해 생기는 동력의 손실은 유체양과 압력감소의 적으로 나타낼 수 있으며 이 동력의 손실을 최대 동력손실로 나누어 정상화시키면 다음과 같은 식으로 표시될 수 있다.<sup>10)</sup>

$$\frac{F \Delta P}{F_M \Delta P_M} = \left( \frac{F}{F_M} \right) \left[ 1 - \left( 1 - \frac{\Delta P_m}{\Delta P_M} \right) \left( \frac{F}{F_M} \right)^2 \right] \quad (3)$$

(3)식을 그림으로 표시하면 Fig. 13과 같다. Fig. 13은 유체량이 40%~80%일 때 동력손실

이 최대가 된다고 제시해 주고 있어 제어밸브가 완전히 닫히거나 열려 있을 때 운영이 가장 효율적이라는 해석을 할 수 있다. 이러한 두 극단은 제어를 하지 않을 때만 이루어질 수 있는 것이며 또한 이러한 관계를 통해서 동력공장들이 최대의 생산을 할때 가장 효율적이라는 점도 설명될 수 있다.

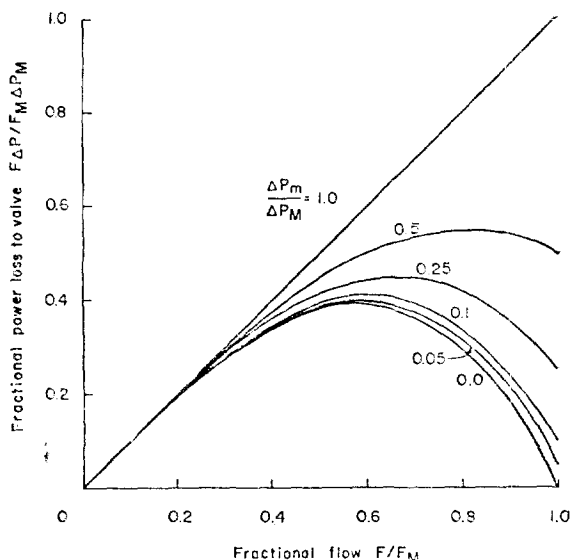


Fig. 13. Power Loss Through Control Valve in a Liquid-Phase System

다시 말해서 제어밸브에서 일어나는 동력손실은 Throttling이 최소일 때 가장 적어진다. 이렇게 하기 위해선 제어밸브를 90% 정도 열어서 운영하면은 제어성도 잃지 않고 에너지 소비도 절감할 수 있다. 이러한 개념을 이용한 것이 밸브 위치 제어(Valve Position Control)이며 Shinskey<sup>2)</sup>가 이 개념을 처음 소개했고 실제로 석유화학 공업의 Depropanizer에 응용했다. Throttling을 최소화하는 예로서는 Fig. 14에서 보는 바와 같이 원유를 증류탑에 충전하기 위해서 터빈에 의해 작동되는 펌프를 사용했는데 이 터빈은 7.5kg/cm<sup>2</sup>g 수증기로 작동되며 일정한 속도를 항상 유지하고 있다. 과다한 펌프의 출구 압력은 유체량 제어밸브에 의해 소도되고 있으며 충전량이 자주 많이 바뀌기 때문에 이 제어에는 상당한 펌프 에너지를 낭비하고 있다.

이 제어기의 출력(Output)에 따라 수증기양이 변하게 하므로써 상당한 양의 수증기를 절약할 수 있었다.<sup>5)</sup> 물론 에너지 소비절약을 함으로써 터빈 작동이 순조롭지 못할 수도 있겠다.

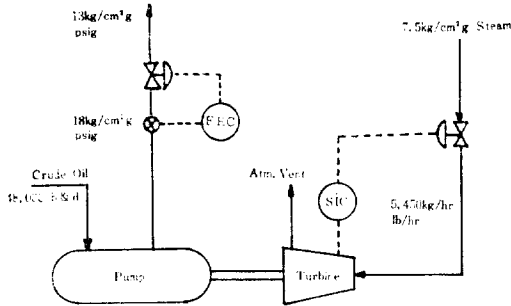


Fig. 14. Crude Distillation Charge Pump

하게 이용할 수 있다는 점에서 주목할 만 하다. 전술한 바와 같이 밸브 위치 제어는 가장 많이 열린 밸브를 90% 정도까지 열리게 하여 Thro-

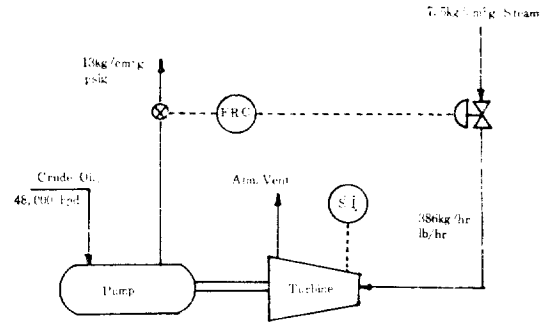


Fig. 15. Control Pump Driver Speed

#### 4. 밸브 위치 제어(Valve Position Control)

밸브 위치 제어(VPC)라는 새로운 개념은 제어밸브에서 일어나는 동력 손실을 최소화 하기 위해서 소개되었고 또 외부의 영향을 가장 유리

tting을 최소화하는 제어 방법이며 적분동작(Integral Action)만 있어서 제어 동작이 빠르지 않아 장기적인 면에서 에너지 소비 절약을 최적화 해준다.

밸브 위치 제어를 Fig. 4와 같은 온도제어 시스템에 적용하면 Fig. 16과 같이 할 수 있겠다. Fig. 16에서는 제어밸브 A와 B의 위치를 비

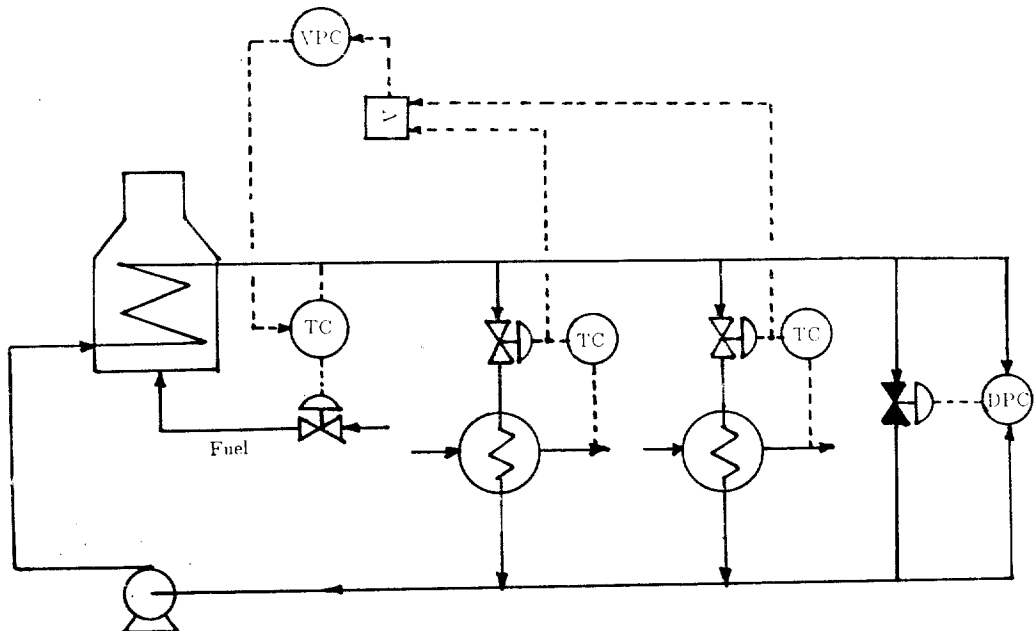


Fig. 16. Valve Position Controller in Heater Temperature Control System

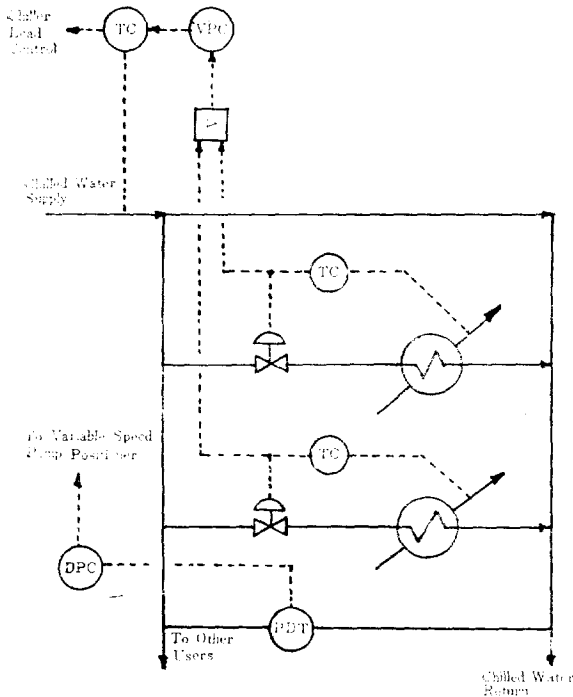


Fig. 17. Valve Position Controller in Chilled Water Temperature Control System

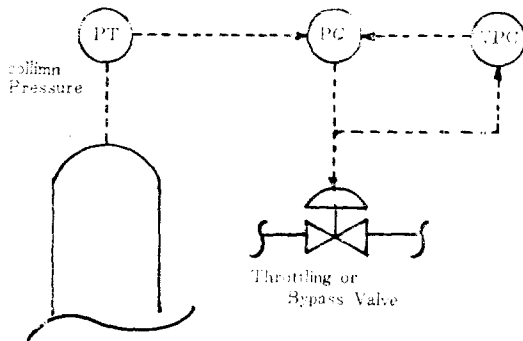


Fig. 18. Valve Position Controller in Distillation Column Pressure Control System

교해서 가장 많이 열린 발브의 위치를 VPC의 측정치로 하고 VPC의 출력(Output)은 가장 많이 열린 발브를 90%까지 열리도록 하기 위하여 온도제어기의 설정치를 다시 낮게 정해준다. 온도 설정치가 낮아졌으므로 연료가 적게 사용되는 것은 당연한 사실이다.<sup>11)</sup> 여기서 VPC는 적분

시간이 긴 적분 동작만 있으므로 온도제어기의 설정치를 서서히 정해주고 있고 또 온도 제어기는 재래식의 동작을 가지고 있기에 잦은 외란(Disturbance)을 빨리 보상해 준다. VPC는 냉각기에도 Fig. 17에서와 같이 응용될 수 있으며 에너지 소비 절약을 최적화 할 수 있다.<sup>12)</sup>

VPC를 Depropanizer의 압력제어에 Fig. 18과 같이 사용하므로써 증류탑의 응축능력을 최대로 활용하여 압력을 천천히 가장 낮게끔 변화시킬 수 있었다(Floating Pressure Control). 압력이 낮아지므로써 Relative Volatility가 증가되어 분리가 용이해져서 상당한 에너지 소비를 절약할 수 있었고 나아가서는 생산량도 증가시킬 수 있었다.<sup>10)</sup>

이 Floating Pressure Control은 압력이 걸린 증류탑에 응용하는 게 좋겠고 냉동증류나 진공 증류에서는 별로 경제성이 없다고 보겠다.<sup>13)</sup> 증류탑에서 Regenerative Heat Recovery로써 Bottom Product를 사용하여 Feed를 가열하는 예가 많은데 이 경우에도 VPC를 Fig. 19과 같이 이용하면 안전도(Stability)도 잃지 않고 Heat Recovery를 최대화할 수 있다.<sup>14)</sup>

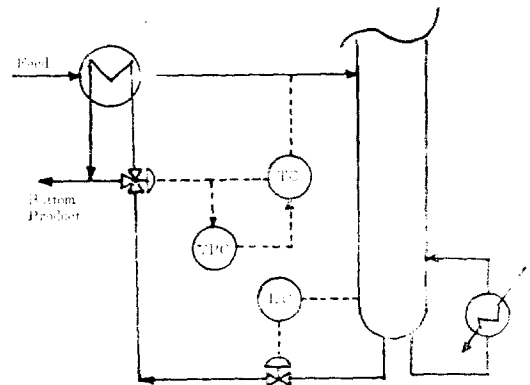


Fig. 19. Valve Position Controller in Regenerative Heat Recovery

## 5. 결 론

일과 열을 연관시키는 열역학 제 2의 법칙을

응용하므로써 오늘날 사용되고 있는 많은 제어기가 비효율적이라는 사실을 알 수 있었다. 에너지 소비 절약을 위해서는 공정의 비가역성을 높여주는 Blending, Throttling 그리고 열전달에서의 과다한 온도차를 최소화 해야 하며, 발브 위치 제어는 새로운 개념이긴 하지만 현재 실제로 응용되고 있어 앞으로 더 많은 응용이 기대된다. 제어 발브 선택과 크기 선정에 있어서도 이 총선에 서술한 것과 같은 재래식 방법에서 탈피한 새로운 방법이 많이 이용되었으면 한다.

### Nomenclature

$F$	Flow through control valve
$F_M$	Maximum flow through control valve
$\Delta H$	Enthalpy change of the system
$\Delta P$	Pressure drop across control valve
$\Delta P_m$	Minimum pressure drop at maximum flow $F_M$
$\Delta P_M$	Maximum pressure drop at zero flow
$Q$	Amount of heat transferred
$\Delta S$	Entropy change of the system
$T_0$	Absolute temperature of the surrounding
$\Delta T$	Temperature differential across heat transfer surfaces
$W$	Work
$W_a$	Available work

### References

1. 강 응기, 화학공학, 15 (1977), 291.
2. G.F. Fauth and F.G. Shinskey, *Chemical Engineering Progress*, 71 (1975), 49.
3. J.M. Smith, "Introduction to Chemical Engineering Thermodynamic", 2nd ed., Mc-

Graw-Hill, New York, (1959), p. 324.

4. F.G. Shinskey, *Instruments & Control Systems*, Nov. (1976), 131.
5. J.H. Bojnowski, "Modernized Separation System Saves Energy!", Paper presented at AIChE 79th National Meeting, Houston (March 16-20, 1976).
6. N.P. Lieberman, *Hydrocarbon Processing*, Feb. (1978).
7. F.G. Shinskey, "Energy Conservation Through Control", Academic press, New York, (1978), p. 149.
8. F.G. Shinskey, *Instruments & Control Systems*, Dec. (1976), 113.
9. W.G. Buchwald, *ISA Transactions*, 14 (1975), 231.
10. F.G. Shinskey, "Energy Conservation Through Control", Academic press, New York, (1978), p. 35.
11. F.G. Shinskey, "Distillation Control for Productivity and Energy Conservation", McGraw-Hill, New York, (1977), p. 159.
12. B.G. Liptak, *Instrumentation Technology*, Sept. (1977), 65.
13. F.G. Shinskey, *Chemical Engineering Progress*, 72 (1976), 73.
14. F.G. Shinskey, "Energy Conservation Through Control", Academic press, New York, (1978), p. 278.

### 감 사

"에너지 소비 절약과 제어"라는 중요한 과제를 연구 분석 검토하도록 허락해 주고 뒷받침해 준 Monsanto 회사에 감사드립니다.

