환경개선 및 에너지 절감을 위한 증발·농축기술

김 순 호
(주)세화환경

먼저 당면한 기술문제를 취급하기 전에 우선 한 가지 상식으로써 언급해야 할 점이 있다. 일반적으로 우리나라 산업계에서는 기술장치 용어로써 Evaporator라는 말을 흔히 사용하고 있는데 우리는 여기서 Evaporator에 대한 정의를 내릴 필요가 있다.

어떤 용해물에 외부에서 Energy를 가하면 용해물 중의 수분이 증발되는 것을 볼 수 있다. 그러나 그의 사용목적에 따라 증발기(Verdamper or Vaporizer)가 될 수도 있고, 농축기(Ein-dampfer, Evaporator)가 될 수도 있다. 예를 들면 해수를 증발시켜 음료수를 얻는 장치는 증발장치가 될 것이며 반면에 그 고형분, 즉 농축액을 얻으려 할 때는 농축기 장치라고 말하는 것이 정확할 것이다.

*사용목적 : ① 물을 얻으려 할 때는(증발기)
② 소금일 때는(농축액)

이와 같은 유사한 실례들은 산업계에서 많이 찾아볼 수가 있다. 그러나 기본적인 물리학적 장치원리와 기술적 용어는 차이가 없다. 다만 용액의 물리학적 성질에 따라 설계 기술에서 유의하여야 할 점들이 있을 뿐이다.

1. Evaporator장치기술과 에너지절약

1.1 일반적인 관점(에너지절약을 위한 몇가지 장치기술들)

이미 알려진 사실이지만 다시한번 에너지절약 기술에서 언급할 필요성이 있다고 본다. 예컨대 식품산업에서 수요자들에게 공급 판매하는 제품은 대부분이 식품 전처리를 거쳐서 수분을 탈수하는 과정과 다음에 건조장치에 들어가는 과정을 거친다.

그중에서 제일 많이 에너지를 소비하는 부분이 농축장치이며 다음이 건조과정이다. 1970년 Holland, Gasunion에는 우유산업에서 도출된 다음과 같은 Data가 발표되었다.

54%…우유의 Condens Milk나 Milk분을 가공할 때 소비되는 에너지
22%…건조과정(예로써 Spray 건조)
24%…나머지 필요에너지 소비(예로써 버터, 치즈, 가공품 등)

이상과 같은 사실에서 볼 때 우유산업에서 3/4의 에너지를 Evaporator와 Dryer과정에서 소비한 것으로 나타나고 있다. 우리나라에서는 아직까지 우유산업이 미국이나 서구라파처럼 아주 활발히 발전되지 못하고 있지만 우리가 알고 있는 여러가지 식품 전체가 원료로 출발하여 에너지를 대량으로 필요로 하는 과정을 거쳐야 한다는 사실만은 틀림이 없다. 특히 농축과 건조과정에서 비용(에너지)을 많이 차지하고 있는 것이 사실이다.

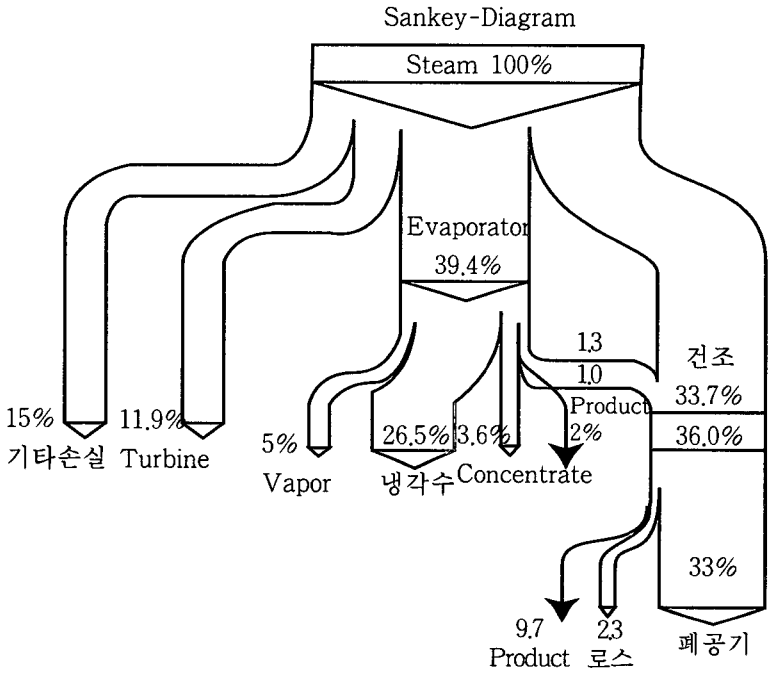
이러한 에너지를 절약하기 위하여 다음과 같은 조치가 필요하다.

1.2 에너지 절약을 위한 대책과 방법

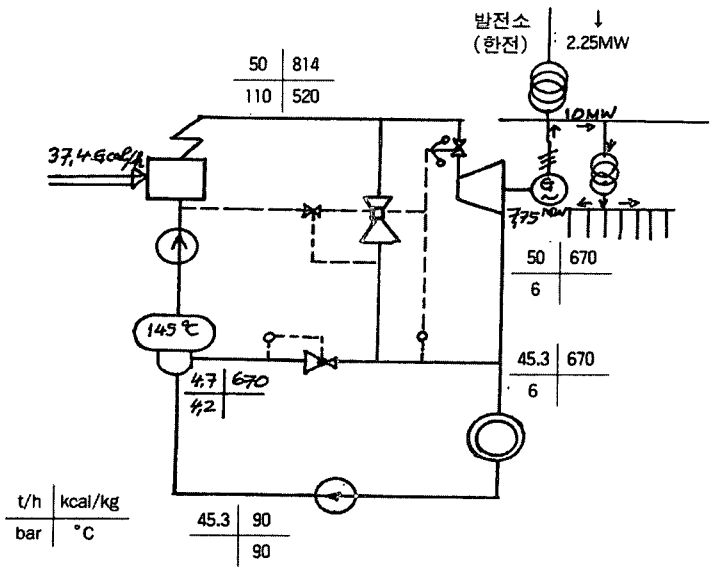
1.2.1 공장 산업용 발전소 문제

공장의 발전소 운영에서는 발전과 관련되는 전체적 공장내 에너지를 보장시켜 주는 Combination 발전소가 필요하다.[그림 2]

공장내 발전소를 공공전기 System Line에 병행



[그림 1] 우유산업에서의 에너지 바란스(독일 우유산업협회)



[그림 2] 우유공장용 Back-Pressure Turbine(Simens 주식회사)

으로 시설 장치하는 방법도 있다. (합리적 에너지 적용) 예를 들면 110Bar 증기를 Bar Back Pressure 터빈(Back Pressure Turbine System : 反압식 터빈 시스템)에 연결시켜 발절을 시키고 6Bar의 수증기를 공장내부의 필요에너지를 사용하는 System(대략적인 일반적 에너지절약을 하기 위한 설치 System)[그림 2]이다. 공장내 발전소 건설과 운영은 독일 대부분 식품공장에서 사용하고 있는 에너지 사용 System이다.

1.2.2 다중식 Evaporator장치

다중식 Evaporator 장치 원칙은 경제적으로 폐증기/폐에너지를 재사용하는 원칙을 기본으로 하는 System이다.[그림 3]

제1단 Evaporator장치에서 발생되는 Vapor를 다음 Evaporator단에서 재사용하면서 이 원칙을 계속 연결시켜 다음 단으로 이전시키면서 계속 사용하는 System이다. 이렇게 함으로써 기본 에너지를 절약하게 된다. 제1단에서 마지막 단까지 압력과 온도의 차이가 있어야 함으로 대부분 경우에 Vacuum장치를 사용하게 된다.

1.2.3 Ejector

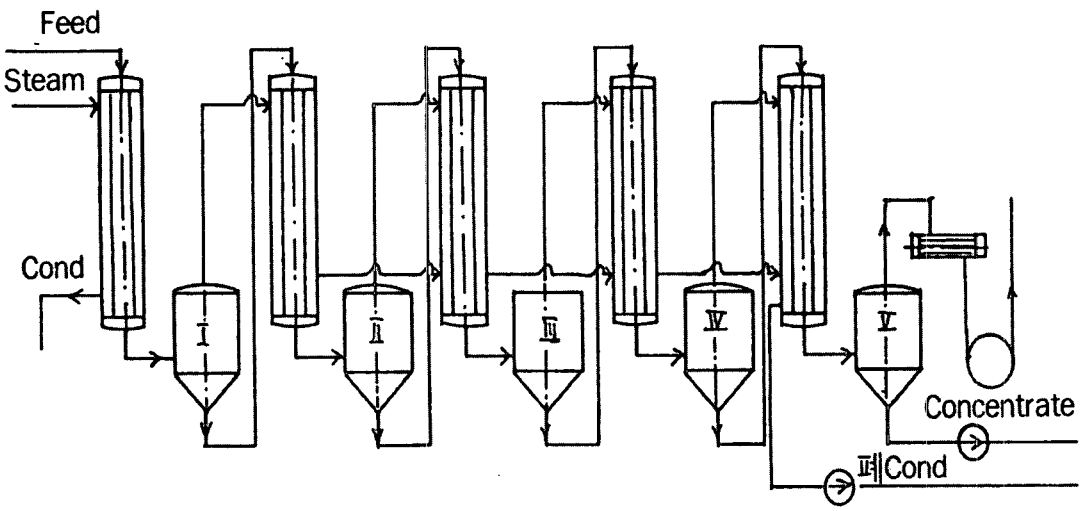
그외에도 장치비용을 절약하기 위하여 Ejector를 적용하는 경우도 있으나 기본에너지 Steam-Condensate 소비와 비용으로 인하여 사용범위가 제한되어 있다. (아주 작은 Plant에서 사용하게 됨)[그림 4]

다중식 Evaporator에서 기초 System 소비률과 설치비와의 관계 Diagram[그림 5]에서와 같이 Stage가 작으면 적은 절열면적이 필요하면서 투자비가 전체적으로 낮게 된다.

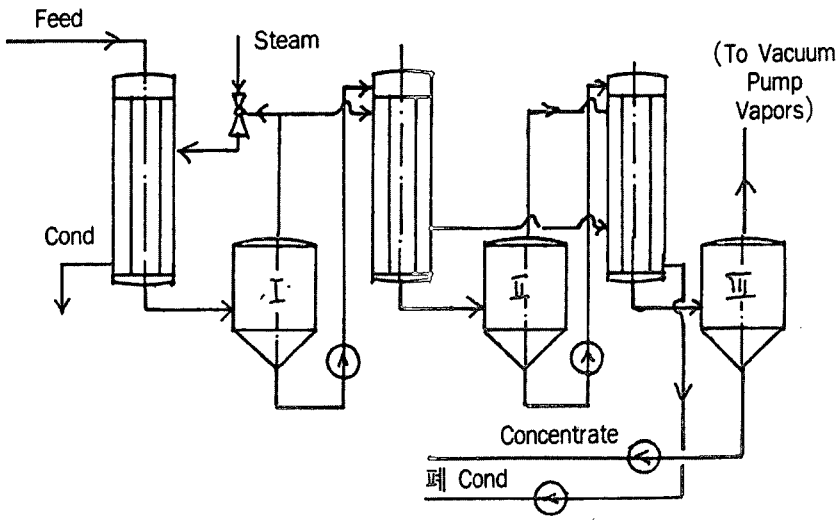
그 반면에 Steam소비량은 크게 된다. 전반적인 경제성 타산과 각 공장내에서의 에너지 조건에 따라 다단식 판단과 Steam 소비량등에 의하여 어느 쪽에 중심을 두겠는가 하는 생각과 장기간(일정한 기간, 5년, 12년) Amortisation에 대한 결론에 의하여 단수를 선택할 수 있다.

어떤 공장에는 자체내의 폐물자를 이용한 화력발전소가 있어 에너지가 남아 돌아가는 공장들도 있다.

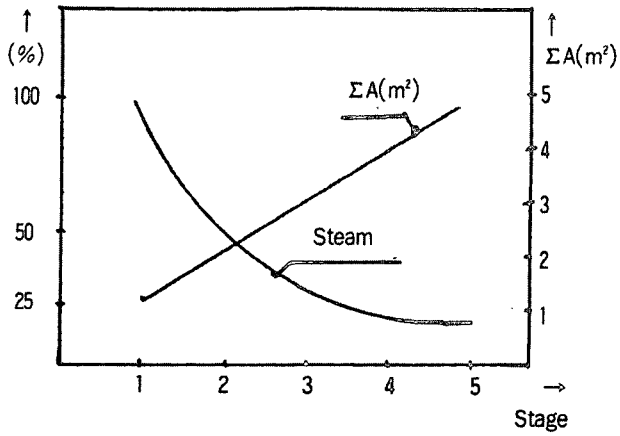
따라서 이상적인 경제성 선택 이론은 각 전문회사들마다 다르나 대략적으로 적용하고 있는 원칙은 작은 처리량에 대하여는 Stage수가 작고 크면 클수록 설치 Stage수가 많게되지만 압력과 온도의 차이가



[그림 3] 3중식 Evaporator ; Steam 소비율:0.21



[그림 4] Ejector를 이용한 3중식 Evaporator Steam 소비율 0.25



[그림 5] Ejector를 이용한 3중식 Evaporator Steam 소비율 0.25

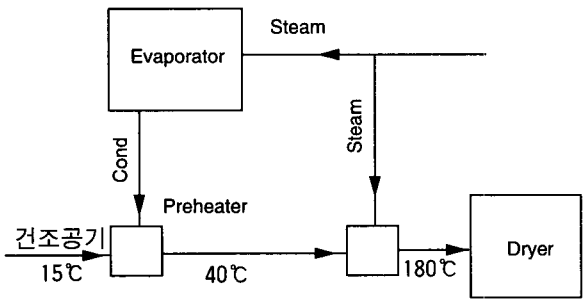
다중식 Evaporator에서는 중요하므로 6중식 이상은 선택하지 않고 있다.

1.2.4 Evaporator에서 발생되는 Vapor 및 Condensate를 재사용하는 Dryer-건조공기[그림 6, 7]

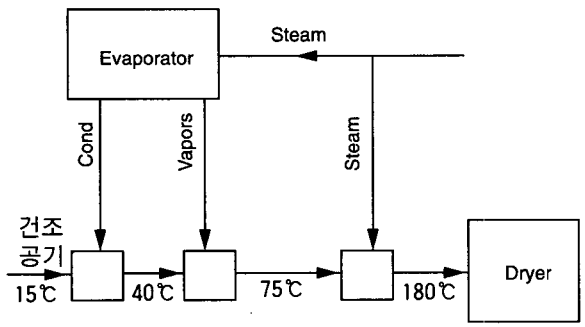
Evaporator와 Dryer는 식품 생산에서 볼 수 있듯이 아주 유기적인 영관성이 있으므로 양분야를 같은 생산 Line으로 보고, 에너지 경제면에서 하나의 Planing Plant로 설계하는 방법이다. 일반적으로 Evaporator에서 발생되는 Condensate로써 건조용 공기를 대략 40℃정도까지 상승시킬 수 있으나 보통 Spray-Dryer에서 사용하는 공기는 적어도 230℃는 되어야 한다. Evaporator의 각 Stage에서 발생하는 Vapor를 부분적으로 건조공기 상승에 적용한다면 아주 대단한 에너지를 절약할 수 있다.

[그림 6]에서 보여주는 Flow Sheet는 재래식 Dryer 장치(식료품 공장에서)이며 건조 공기를 다만 Evaporator에서 발생되는 Condensate만을 사용하여 공기를 15℃에서 40℃까지 상승시키는 Process이다. 40℃에서 180℃까지는 Steam을 이용하여 가열시킴으로써 비경제적인 장치가 되었다. 반면에 [그림 7]에서는 Evaporator에서 나오는 Vapor를 부분적으로 잘 이용하여 건조공기를 40℃에서 75℃까지 높이게 된다.

이때 에너지는 약 140% 가량 절약된다. 이와 같은 아이디어는 아주 단순한 것이지만 그외의 다른 에너지 절약방법, 예를 들면 Heat Pump를 이용하는 방법등도 있다.



[그림 6] Condensate를 이용한 건조공기 가열장치 (재래식)



[그림 6] Condensate와 Vapors를 이용한 건조공기 가열장치(최신식)

1.2.5 장래 에너지 절약방법으로 Vapor Recompressor을 이용하는 방법

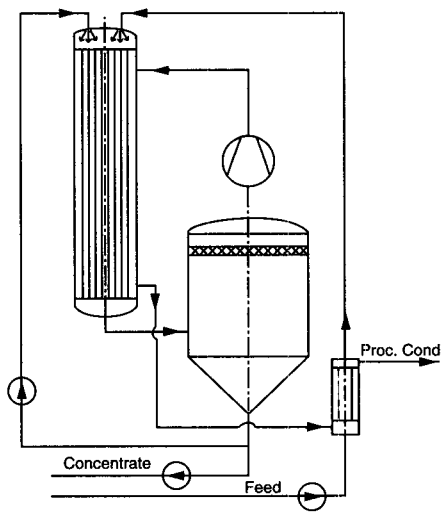
1.2.5.1 기계식 Recompressor

이 방법은 Evaporator 장치에서 발생하는 Vapor를 기계적인 Compressor로 압축시켜 기본에너지 대신 Evaporator에 재사용할 수 있게 하는 것으로 실제적으로 관찰하여 보면 Condenser가 필요없는 것으로 된다. 결과적으로 에너지 손실만큼 기본에너지를 보충하는 것으로 된다. [그림 8, 9] 이 방법은 경제성이 매우 좋고 운영비가 저렴하나 그 대신에 설치투자비용이 높고 운영하는 전문가들이 필요하고, 소음문제가 크고, 건설비용이 많이 든다.

특히 Vapor 자체가 깨끗하여야 하며 Vapor의 수분포함이 아주 적어야 한다. 그리고 Vapor를 Compression시켰을 때 압력과 온도를 무한대로 상승시킬 수는 없다.

대부분의 경우 Vapor의 온도상승은 14℃ 정도까지이며 그 이상은 다단식 Compressor를 연결시켜 사용 Vapor를 얻게 되므로 Plant의 전체적인 비용(투자비)이 확대된다.

물론 이 문제 적용에서도 단위기간내 전체 Plant에 대한 Amortisation계산을 하여야 한다.



[그림 8] Recompression을 이용한 Falling-Evaporator

1.2.5.2 Steam Ejector

Steam Ejector의 압축방법은 이미 오래전부터 에너지를 절약하기 위하여 사용하고 있으나 그 이용범위가 아주 제한되어 있다. 특히 유량의 크기가 제한되어 있으며 대형 Evaporator에서는 이용되지 못하고 있다. 단점으로는 일반적 Evaporator와 마찬가지로 Condenser를 이용하여야 하고, Steam과 Vapor를 응축시켜 열을 파괴한다는 점이다.

효율의 결과로써 평가한다면 일반 다단식 Evaporator 장치에서 Steam Ejector를 사용할 때 하나의 단을 절약하는 대신에 고가의 Steam 손실(보통 10~13 Bar 압력증기 사용)이 있다.

1.2.5.3 냉매 열펌프를 이용하는 Evaporator

이와 같은 Evaporator는 설계구조가 간단하고 설치비용이 저렴하고 Operating이 비교적 간편하여 일반공장의 소수량 산업폐수에 적합한 소형 Evaporator장치이다.

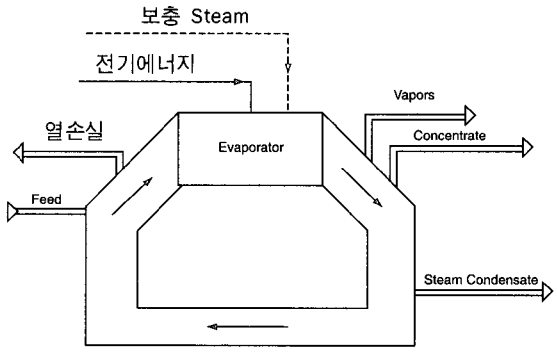
Heat Pump의 적용예는 [그림 10]과 같으며 적용원칙을 설명하면 다음과 같다.

용기에 Product를 넣고 초기의 에너지를 가하면 Vapor가 발생하면서 상부에 설치되어 있는 Condensation부분에 부딪치면서 Tube내부의 냉매가 증발하면서 외부의 Vapor가 발생하게 된다.

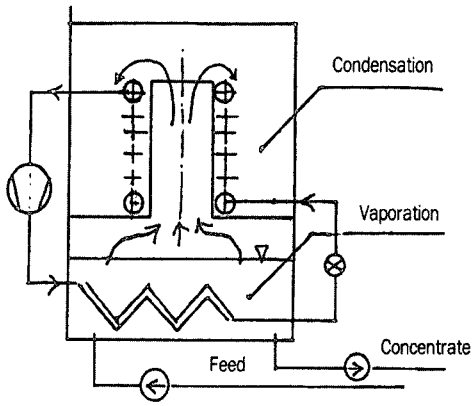
이와 같은 순환과정이 계속 진행되면서 연속 Evaporator작용이 계속된다.

그리고 물론 Concentrate를 계속 배출시키고 Feed도 역시 Pump의 역활로 계속 용기에 들어가게 된다. [그림 11]에서 보는 Evaporator장치는 냉매 Pump Evaporator 장치와 달리 냉매가 Tube내부를 순환하는 것이 아니라 용기 외부에서 Vapor을 발생하고 이를 Recompression시켜 다시 용기내부의 가열기에 통과시킨다. 바로 이 과정에 용기내부에서 열교환이 생기면서 Tube 외부에서 Vapor가 발생된다.

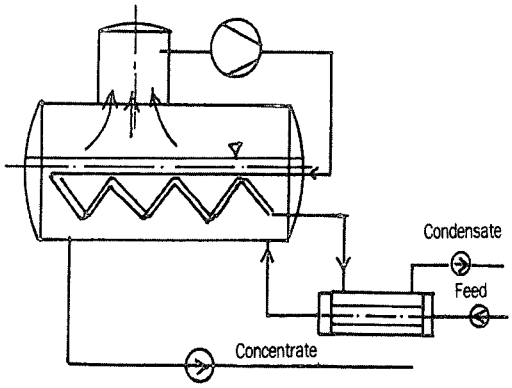
Vapor의 Condensation을 Tube 내부에서 진행되고 그 열을 Feed의 Preheater에서 재사용하게 된다. 이와 같은 Evaporator 원칙도 역시 산업계(공장)에서 소수량 폐수를 처리하는 데 많이 사용하고 있다.



[그림 9] Recompression을 이용할 때의 열관계



[그림 10] (열 Pump)냉매를 이용하는 Evaporator (적은 유량을 처리하는 이유)



[그림 11] Recompression를 이용하는 Evaporator (적은 유량을 처리하는 이유)

1.3 재래식 Evaporator장치와 Dryer장치기술의 Combination 방법[그림 12]

이 방법은 실제 문제 해결에 가장 적합한 Combination이며 특히 환경기술에서 많이 이용될 수 있는 장치이다. 환경오염이 된 용액은 대부분의 경우 고형분에 문제점이 아주 많다. 농도가 상승함에 따라 용액의 Scale의 Tube 내부에 많이 붙고 그로 인하여 Evaporator 장치성능이 떨어지고 때로는 작동이 곤란한 경우까지 도달한다.

대부분의 경우 농축도가 40% 이상이 되면 아주 문제가 된다.

그러므로 용액의 성질에 따라 일반 재래식 Evaporator 장치를 쓰고 나머지 어려운 농도부터는 Dryer방식에 의하여 농축문제를 해결하는 방법이 사용된다. 그리고 포장할 수 있는 건조품을 요구할 경우도 있으므로 Dryer를 이용하지 않으면 안되는 경우도 있다.

Dryer가 아닌 다른 방법도 있다. 예를 들면 Evaporator후부에 Decanter를 연결시키는 방법도 있지만 운영비와 운영에서의 어려움을 피할 수 있는 방법이 바로 이상의 Combination 방식이다.

*[그림 12] 설명

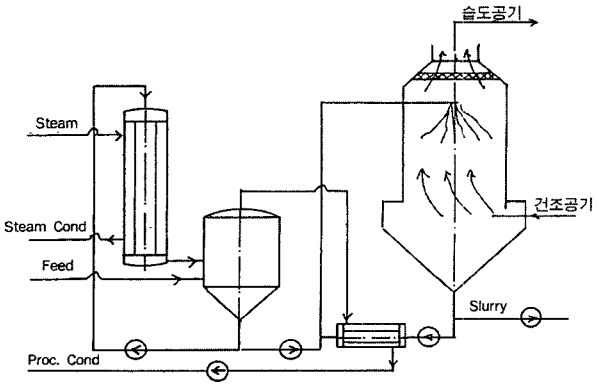
첫째로 Product를 펌프로 Evaporator 장치 내부에 운반하고 순환펌프를 돌리면서 가열기에 Steam을 가하여 유체를 가열한다. 가열기의 원칙은 Falling 원리이므로 Product를 가열기의 Cover(Chamber)에 넣고 잘 분포시키면서 Tube 하부쪽으로 Product를 Tube 벽면에 따라 흐르게 한다. 나중에 액과 Vapor의 혼합물은 Separator에 들어가고 그 내부에서 Vapor와 액체가 분리하게 된다.

이와 같은 과정이 연속적으로 계속되면서 Concentrate의 일부는 Dryer 장치에 들어가게 된다. Separators에서 산출되는 Vapor는 Sludgy 혼합액을 Pre-Heating시키는 역활을 하고 있으며 그와 동시에 Scale이 생기는 Product들은 Spray식 건조탑에서 건조되면서 Sludgy를 배출시킨다.

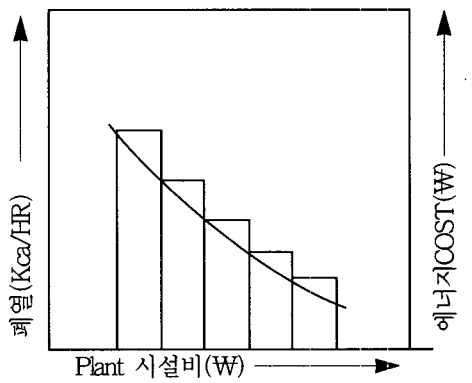
1.4 최신식 Combination장치-Membrane/Evaporator/Dryer[그림 13]

옛날이나 지금이나 할것없이 어떤 Product를 가열시켜 수분을 탈수하거나 나중에 포장할 수 있는 제품을 만드는 생산공정은 필요하며 대부분의 경우에 Evaporator 장치 기술을 사용하게 된다.

다만 그 차이점은 어떻게 하든지 에너지를 절약하고 생산제품의 질을 높이는데 노력을 많이 하여 기술자체의 발전이 급속히 진행되었다는 점이다. 그러므로 각 제조회사들마다 자기 자체내의 조건과 사정에 따라 어떤 기술을 적용하여 자기네들의 문제를 해결할 것인가는 개인적인 판단에 따라야 한다. 그러나 모든



[그림 13] 폐수처리용 최신식 장치: Membrane/Evaporator/Dryer/-Combination



[그림 14] 폐열과 Plant 시설비와의 관계

Technology의 발전과 이용에서 그 활용범위는 반드시 제한되어 있으며 장점과 단점이 있다.
예로써 Ro-Technology는 Membrane의 재료가격은 싸나 그에 필요한 전기에너지는 고가이며 Operating 과정의 경비와 유지문제에서 여러가지 곤란한 점이 많다. 그리고 예를 들어서 각 폐수의 질이 다르면 그 해결 방책이 제각기 달라야 한다. 그러므로 이에 대한 Membrane의 개발과 아울러 실험과 연구사업이 활발하다.

농축기술(Evaporator)에서도 재래식 Steam을 사용할 경우 많은 경험에 의하면 현재에도 여러가지 어려움이 많은 것이 사실이다. 여기에서도 그의 이상적인 활용범위가 있다.
예를 들면 대부분의 농축 Product가 가열기를 거쳐서 그 농도가 상승되면 가열기의 가열체 내부에 Scale이 많이 끼고 나중에는 작업할 수 없을 정도로 Scale이 축적되어 가열기를 사용하지 못하는 경우들이 많다.
폐수 처리에서 이와 같은 세 가지 농축 및 건조기술을 잘 적용시키기만 하면 어떤 이상적인 Combination 기술장치가 될 것이다.

농축액의 처리에서 정확히 해석하고 관찰하여 보면 다음과 같은 결론이 나오게 된다. 농축의 초기 과정에서 증발량이 제일 많이 발생되고 있으며 그리고 농축도가 높아짐에 따라 수분이 급격하게 줄어드는 것을 볼 수가 있다. 그러므로 에너지가 많이 필요하나 취급이 간편한 부분은 Ro-장치를 사용하고(대략 20~25 VOL.%) 50~60%까지는 Product의 성질에 따라 Evaporator 장치를 이용하는 것이 실제 문제를 해결하는데 도움이 된다.

고농도 범위에서는 (60% 이상의) Dryer기술을 적용시킴으로써 전체적으로 높은 비용과 어려움을 피할 수 있다.
Combination 장치의 선택에서 몇가지 고려해야 할 기준(Criterion)들은
*첫째:기술적 사용범위의 이상화
*둘째:경제성 에너지절약과 운영 그리고 유지문제
*세째:국가 법령과 국민들의 건강문제와 자연보호 문제등이다.
위의 기준을 고려해 보면 세 가지 Plant의 Combination을 선택한 이유가 설명이 된다.
위의 기준을 고려해 보면
Criterion 1:Ro-기술은 농축도가 비교적 낮고 수분의 증발량이 많은 범위에서 사용(에너지 절약).
Criterion 2:Ro-기술로써 처리하기 어려운 농축도부터는 Evaporator에서 취급하고 에너지 소비도 저렴한 점.
Criterion 3:Evaporator에서 취급하기 어려운 농축도부터(60% 이상)는 Dryer에서 처리함으로써 기술적 어렴움이 없다는 점.

2. 종합적인 결론

농축의 목적을 달성하기 위하여 여러가지 물리학적 Process과정과 방법이 있으나 이 문제 해결을 취급하는 기술자들과 Engineer들이 어떻게 하면 이와 같은 문제에서 에너지를 절약하고 장치 설비비용을 적게하며 Operating을 편리하게 하겠는가 하는 생각을 하여야 하겠다.

폐열과 장치 시설비용과의 관계는 서로 상반되는 연관성을 가지고 있는 것으로 인식된다.[그림 14]

폐열도 역시 에너지이다. 물론 기본 에너지에서 여러가지 Process과정을 통하여 나오는 폐에너지이다. 이에 따른 해결 대책으로써,
(1)농축장치에서 발생되는 Vapor와 Condenser, 그리고 건조 장치 기술에서 나오는 고온 폐공기를 재사용
(2)이상의 문제 해결에서 필요한 Pre-Heater, 열 Pump, Ejector, Heat-Compressor 등의 제반 기계와 기구들을 잘 활용
(3)열 및 화학기계를 비롯한 장치기구들을 합리적으로 설계
(4)여러 시설의 가공 및 운영비용을 절약하기 위하여 실제 문제를 해결할 수 있는 설계 아이디어와 수리 및 기계/기구 교체문제에서의 이상적인 경영과 조직운영
(5)저가 에너지(낮은 온도)를 고가 에너지(높은 온도)로 변화시키는 기술을 개발하여 에너지 절약기술에 활발하게 응용