

산업용 히트펌프의 기기

— SYSTEM

1. 서론

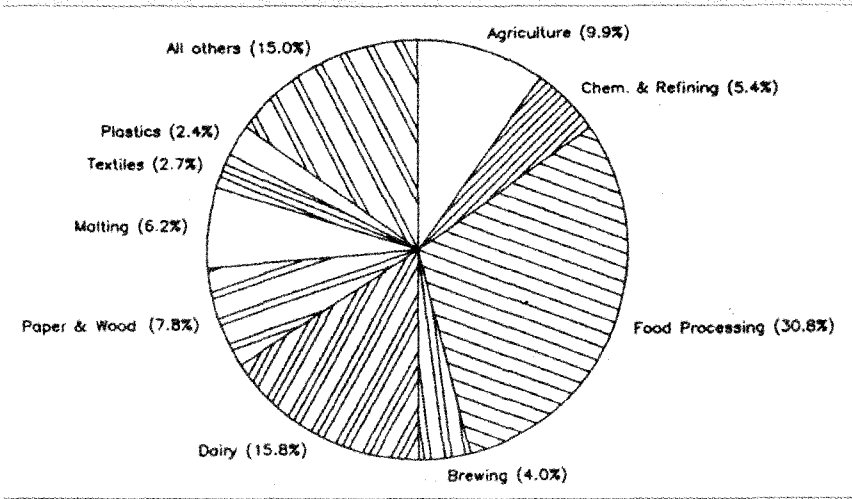
선진국에서의 산업체의 1차에너지소비자가 전체에너지소비의 약 30%내지 40%이고, 이 에너지의 약 70%내지 80%가 공정용 열에너지로 사용되고 있다. 이러한 공정용 열의 온도범위를 안다는 것은 매우 유용할 것이다. 산업공정의 다양성 때문에, 평가는 서로 다른 각 국가의 산업구조에 달려있다. 어떤 추정에 의하면, 산업체 열에너지의 60%이상은 300°C이하의 온도이고, 약 20%내지 30%는 150°C이하이다. 후자가 히트펌프의 실제적인 상한치이므로, 히트펌프의 사용가능은 그 범위내에 있다. 그 150°C이하의 에너지가 총에너지수요의 약 4%내지 10%이므로 많은 산업분야에서 히트펌프가 광범위하게 이용되고 있다는 것은 정당화될 수 있다.

그보다도 현존하고 있는 시설을 보면, 유럽에서의 총용량이 1987년에 850개의 시설로 단지 2500MW에 달하였으며, 하나의 평균용량은 3MW로 오히려 적절하다고 할 수 있다. 그 이유는 목재조건과 어류양식용으로 노르웨이와 핀란드에 주로 설치된 하나의 용량이 1000kw인 수천개의 소용량시설을 생각해볼 수 있다. 여기서 예비질문으로는 산업용 히트펌프가 왜 그렇게 작

은 것이 사용되는가에 대한 이유이고, 심지어 기술수준은 성능과 신뢰성에 있어서 분명한가이다.

산업용 히트펌프에 대한 첫 번째 장애는 1985년과 1986년에 발생한 것으로, 8개월의 단기간에 25\$에서 10\$로 유류가격의 급락이다. 첫째로는 이 가격폭락은 생산제품의 가격에서 에너지의 경제적인 중요성을 갑자기 감소시켰으며, 둘째로는 그것은 다양한 에너지원의 비율을 바꾸었다. 예를들면, 전기값은 상대적으로 떨어지지 않았기 때문이다. 경제적으로 불리한 결과들이 많은 전기구동 히트펌프부터 발생하였고, 그의 관리수익성을 의미하는 COP는 몇 달내에 2.8에서 5.1로 높아졌다. 첫 번째 장애에 대한 이유를 요약하면 산업체용의 모든 유류와 천연가스에 대한 에너지가격이 지나치게 낮다는 것이다.

두 번째의 장애는, 수백kw인 크기에 있어서나 산업공정의 특별한 수요를 위해서나 모두, 각 적용의 목적을 위해 일반적으로 설계 및 실행된 시설과 장치의 비규격화에 있다. 이것은 설계자와 설치자의 경험에 따라 신뢰성문제를 발생시킬 수도 있고, 더욱이 무엇보다도 산업체에서 수용가능한 투자비의 단기회수기간을 유념하면, 통상적으로 설치비용을 높게 하는 결과를 가져오게 된



[그림 1] 유럽의 산업용 히트펌프의 부문별분포

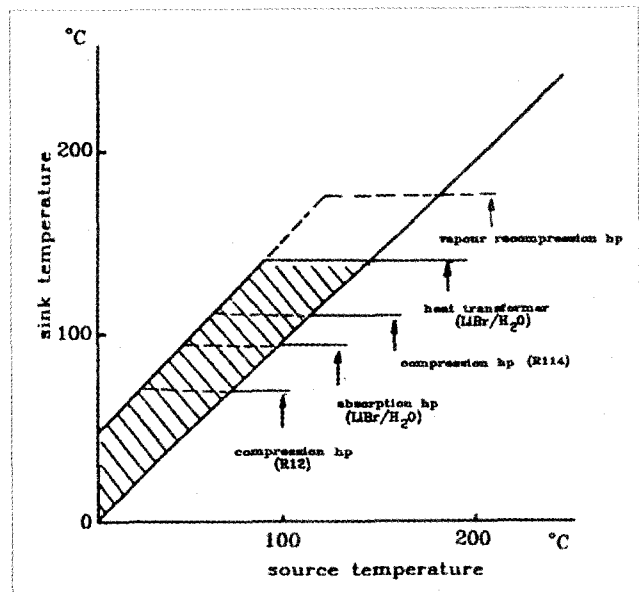
미하는 것은 아니다. 이와는 달리 식품산업에서의 조기이용으로 설치의 숫자가 증가하였고, 초기의 공장들로부터 좋은 결과를 주어왔기 때문이다. 따라서 이러한 히트펌프기에 대한 산업용기술에 관해 검토하고자 하였다.

2 히트펌프기술의 검토 및 분류

다는 것이다.

신뢰성의 장애만을 단기간내에 극복될 수 있기 때문에, 이러한 장치를 다루는데는 무의미 할지도 모르나, 최근의 시설을 보면, 에너지절약의 산업용 히트펌프의 선택에 대한 주요 이유는 아니라는 것을 발견하게 된다. 즉 그것은 가동 문제의 해결이다. 공정의 제어를 좋게 할 수 있고, 배출물의 오염감소, 폐열의 온도저감, 또는 냉각수이용의 절감 등이 가능하다는 것이다. 종종 이러한 가동문제는 주목적으로서가 아니라, 경제적으로 명백한 에너지절약을 가져오는 히트펌프에 의해 에너지관리자가 해결을 하는 것이다. [그림 1]에 나타낸 바와같이 유럽에서 산업용 히트펌프의 산업분야보급을 보면, 낙농업과 양조업을 포함하여 50%이상이 식품산업에 보급이 되고 있으며, 식품산업에서의 히트펌프의 우세는 이러한 분야에 히트펌프의 가능성이 더 많다는 것을 의

산업용 히트펌프로는 적어도 100°C이상의 고온정치만을 예상할지 모르나, 40°C내지 50°C의 HVAC장치와 유사한 온도를 갖는 것이 매우 많이 적용되고 있으며, 그 보다 더 낮은 온도에도 적용도 있다. 하나의 실례로서, 연어부화장의 물



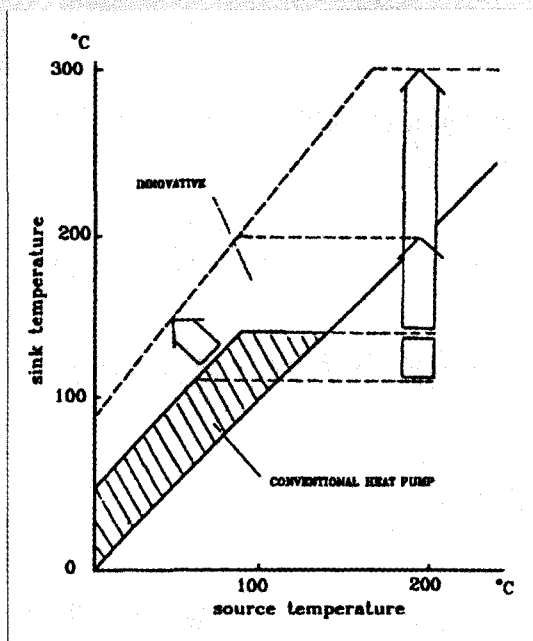
[그림 2] 유다양한 산업용 히트펌프의 온도한계 ▶

가열은 탱크내의 물을 13°C로 유지하기 위해 -5°C와 25°C사이에서 작동하는 히트펌프를 필요로 한다. HVAC온도(50°C내지 60°C)보다 약간 더 높은 온도에서의 또 다른 적용으로는, 대표적인 예로서 수예열, 세탁소와 건조실에서의 건조, 농축 공정, 그리고 식품공정에서의 수가열이다.

산업용 히트펌프와 그 외의 용도인 히트펌프의 주요차이점은 단지 고온용이라는 것이다. 그래서 두 개의 요점 즉, 최대작동온도와 고온측과 저온측사이의 최대온도차이를 고려할 수 있을 것이다. 이러한 값을 [그림 2]에 나타내었으며, 이것은 3개의 기계적 압축식 히트펌프(고온증기재압축)와 두 개의 흡수식 히트펌프(현재의 사이클과 열변환기)를 예를들어 설명한 것이다. 이 선위의 점들은 세로좌표로서 고온측 싱크온도와 황좌표로서 열원온도를 나타내며, 예를들면 통상의 압축식 히트펌프에 대해서는 70°C/20°C, 고온용 히트펌프에 대해서는 110°C/60°C, 그리고 증기재압축식에 대해서는 180°C/130°C를 갖는다.

사분면꼴위의 대각선과 사분면꼴의 대각선사이의 거리는 히트펌프의 고온측과 저온측사이의 온도차이며, 이 차이는 모든 작동범위에 대해서 일정하게 약 50°C라는 것을 이해할 수 있다. 여기서 제시된 한계는 작동유체, 압축기 및 열교환기의 최근 기술적인 개발에 의해 초월될 수 있을 것이다. 일본의 슈퍼히트펌프 축적시스템은 히트펌프내의 온도범위와 온도상승폭의 증가로 [그림 3]에 나타낸 새로운 선을 요구하고 있다. 열원의 온도가 20°C라면 고온측의 싱크온도는 110°C까지 가능하다는 것이다.

그리고 장치는 밀폐형사이클과 개방형사이클의 두 개의 주요그룹으로 분류될 수 있으며, 전자에서는 작동유체는 하나의 사이클을 통해 순환한다. 즉, 압축장치의 냉



[그림 3] 일본의 슈퍼 히트펌프에 의한 새로운 온도한계

매와 흡수식 장치의 냉매와 흡수액의 혼합이다. 후자에서는 작동유체가 바로 공정유체, 예를들면 재압축 증기이다. 유럽에서 대용량 시설의 대략 반은 개방형사이클(주로 증기재압축)이라고 예측되고 있다.

장치는 또한 작동유체가 저압력에서부터 고압력으로까지(증기재압축 포함)이고, 두 번째 그룹은 흡수식 히트펌프(열변환과 개방형 사이클 흡수식 시스템 포함)이다. 엄격히 말하면, 증기분사 압축도 포함될 수 있다. <표 1>에 요약하였다.

기계 압축식	밀폐형 사이클 개방형 사이클
열 압축식	흡수식 (전통적인 장치) 열변환기 (히트 트랜스포머) 흡수식 (개방형사이클)

<표 1> 산업용 히트펌프의 분류

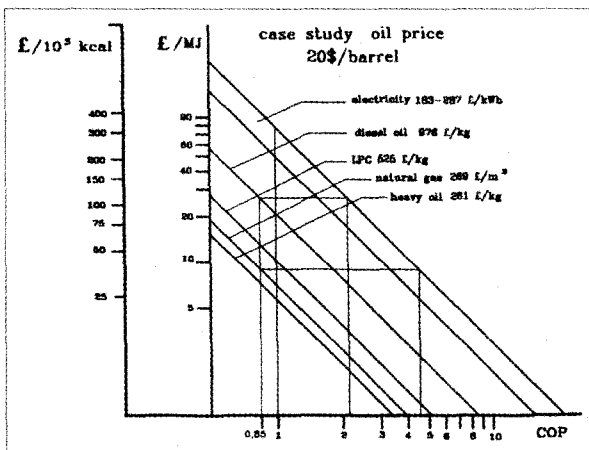
3. 기계압축식 히트 펌프

3.1 밀폐형 사이클

압축식 산업용 히트펌프가 주거용 및 상업용 상품과의 차이는 온도범위, 작동유체 및 용량에서 주로 다르고, 원리에서는 유사하다. 이러한 것들은 전기에너지, 또는 가스나 디젤엔진에 의해 구동이 가능하고, 드물게는 매우 큰 용량에 대해서는 중유로 구동된다. 타시스템과의 구동비용에서의 등가가치를 위한 최소히트펌프 COP는 연료가격에 의해 결정된다. [그림 4]는 산업체의 소비자들을 위해 여러 가지의 연료 즉, 전기, 천연가스, 디젤유, 액체석유가스, 중유에 대한 가격등가성을 이탈리아 가격인 Itf 로 나타낸 것이다. 여기서 오일가격은 $\$20/\text{barrel}$ 으로 하였다. 이러한 등가표는 각 국가마다 연료 및 전기값이 다를 수 있기 때문에 그 국가에 맞는 등가표를 만드는 것이 필요하고 여기서 제시한 것은 하나의 예로서 이용될 수 있다. 가격은 연료에 대한 통상의 단위인 천연가스 m^3 , 전기는 kWh로 표현하였다. 전기값은 다양한 계약에 따라 광범위하므로 2개의 전기값범위를 정하였다.

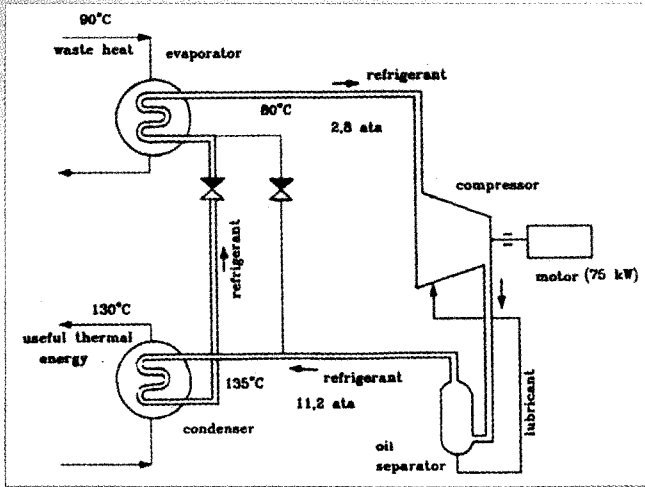
예를들면, 전기압축식 히트펌프와 천연가스보일러를 비교하면, 보일러의 연소효율이 0.85이라고 하면 0.85에서 수직상방향으로 올라가 천연가스의 선과 만나고, 여기서 수평으로 오른쪽으로 따라가면 전기요금율의 함수인 전기요금의 두선과 만나는 두점은 COP가 3.5~4.6이다. 즉 COP가 3.5내지 4.6이어야만 천연가스 보일러와 비교하여 에너지비용의 등가가성이 있다는 것이다. 중유에 대해서는 COP가 4 또는 6으로 증가하는 반면, 디젤유에 대해서는 2보다 약간 더 높다. 어떤 다른 비교도 가능하며, 예를들면 PER 1.5인 가스엔진 구동 히트펌프는 구동비용에 있어서는 COP 7인 전기히트펌프에 상당한다. 비교결과 가격에 상당히 의존하며, 따라서 이러한 것들은 일반화할 수는 없지만, 전기히트펌프는 3보다 더 작은 COP를 갖는 산업용으로는 제안할 수 없다. 그것은 적어도 4에 도달하여야만 가능하고, 이것은 온도범위에 있어서 제한이 발생한다. 사실 실제 COP는 Carnot COP의 대략 반으로 평가될 수 있으며, 다음과 같이 잘 알려져 있다.

$$COP = \frac{T_1}{(T_1 - T_2)}$$



[그림 4] 구동비용을 위한 등가도표

여기서 T_1 과 T_2 는 고온측 싱크온도 및 열원측 온도이다. 100°C 의 T_1 에 대해서, COP가 3과 4사이에서는 온도차이는 50°C 와 60°C 사이에 있다. 압축식 히트펌프는 그러한 온도차는 어렵게 극복할 것이며, 그리고 최대온도는 열원 온도가 알려지면 평가될 수 있다. 산업용 히트펌프의 계통도를 [그림 5]에 나타내었다. 비교적 높은 온도범위 때문에 CFC-12와 HCFC-22의 이용을 어렵게 하고 있다. CFC-114는 100°C 이상의 온도발생용으로 보통 사용되고 안정성도 좋다. Westinghouse(Templifier)에서 1970년대에 개발한 장치는 100°C 까지 상당히 높은 COP로 작동이 가능하고, [그림 6]은 실용적인



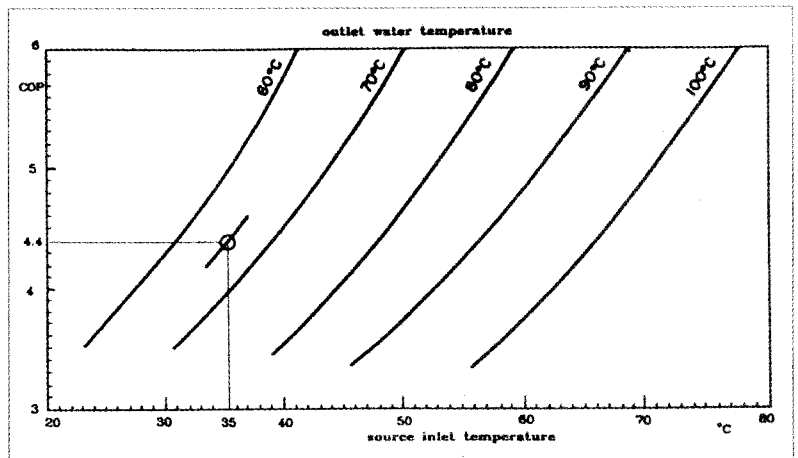
[그림 5] 산업용 히트펌프의 계통도

효과가 있는 다양한 온도에 대해서 열원온도의 함수로서 이 히트펌프의 COP를 나타낸 것이다. 예를들면, 35°C의 저온열원이 COP 4.4로 65°C의 실용적인 온도를 공급할 수 있다. 온도가 증가되면, 작동유체의 안정성외에, 압축기의 윤활유의 안정성도 역시 제어되어야만 한다.

불행하게도, 이러한 장치에 대해 가장 호평 받는 작동유체인 CFC-114는 Montreal의 정서이후 1996년부터 금지되었고, 새로이 적합한 작동유체를 찾는다는 것은 쉬운 일이 아니다. HCFC-134a는 최대사용한계는 실험으로부터 80°C라고 제시되고 있는 반면, HCFC-142b는 90°C의 응축온도에도 사용할 수 있다. 더욱이 HCFC-123은 안정성이 좋고 135°C의 증기온도에도 사용할 수 있다는 것이다. 일본에서 수행한 Super Heat Pump

Energy Accumulation System의 구성에서 흥미있는 결과들을 얻었다. 이 히트펌프는 50°C와 150°C사이에서 작동하며 작동유체로서 ruifluoroethand(TFE)과 물의 혼합물을 이용하는 것이다. 작동유체를 몰로 하고 200kw파이롯트시설을 건설하여 저온열원이 150°C일 때 실용적인 효과가 있는 온도는 300°C에서 얻어졌다. 등온과정에 도달하기 위해 압축과정중에 물분사, 고압에서 저압으로의 스크류팽창기 등 이러한 장치에 대한 많은 기술개발이 보고되고 있다.

이것은 고온의 온도와 COP에 대해서 모두 산업용 히트펌프에 있어서는 어느정도 혁명적이며, 더욱이 에너지축적시스템이 동시에 개발되었다. 이러한 것들은 수화(水化)와 탈수의 화학반응에 근거하여, 상당히 큰 효율로 150°C까지 에너지저장을 허용하고 있으며, 저장용량은 회수가능량이 저장에너지의 약 80%로 250kJ/kg이상이다. 이 기술은 전기의 저가격 시간중에 이러한 장치의 사용을 허용하는 것이다. 특히 흥미로운 것은 일본의 과제로 효율이 높



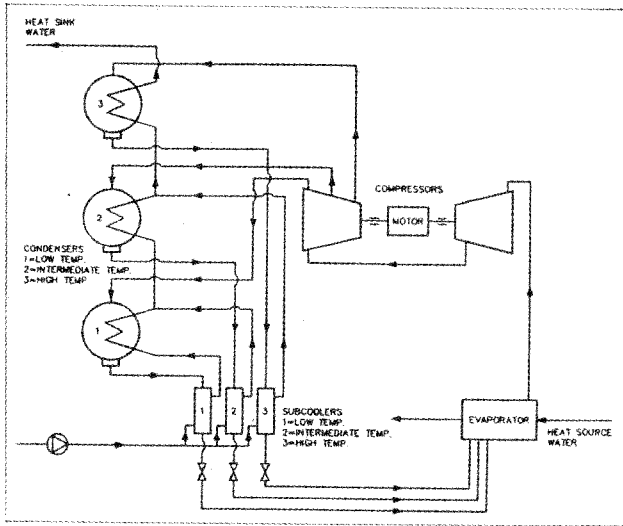
[그림 6] 열원온도의 함수로서 다양한 이용온도에 대해 Tempifier히트펌프의 COP

은 가열용 히트펌프로써, 목표는 50°C~85°C의 온도열역에서 COP 8을 갖는 것이다. 200kw의 시작품에 대해 요구된 COP는 7.7이고, 같은 온도에 대해서 카르노COP가 10이라는 것을 생각하면, 이것은 매우 높은 값으로 고려되어야만 한다. 이

든 개발품은 상품으로 이용가능할 때 산업부문의 히트펌프 응용에 영향을 미칠 것은 확실하다.

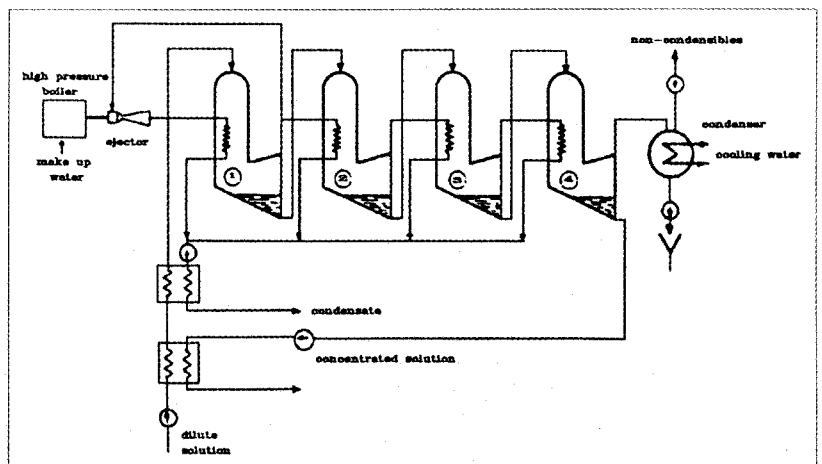
3.2 개방형 사이클

고온용 히트펌프에서 작동유체의 선택은 주요 기술적인 문제중의 하나이다. 증기재압축 히트펌프에서는 작동유체가 바로 공정유체, 통상 증기이므로 근본적으로 해결이 된다. 많은 산업공정들은 증류, 농축 및 건조용 증기를 발생시키는 것이 가장 광범위하다. 가열에 의해 형성된 증기는 기계식 압축기에 의해 이용되고, 압축은 응축열온도를 상승시키므로써 실용적인 효과가 있는 온도는 상변화로 공정에 되돌려질 수 있다. 발생된 에너지는 압축에너지보다 몇 배 더 높을 수 있다. 작동원리를 설명하기위해, 거의 전통적으로 증발에 의해 얻어지는 [그림 8]의 농축공정을 검토하기로 한다. 농축은 가장 높은 압력과 온도에 있는 첫 번째 원주모양의 증발을 갖는 다단계가 통상이다(그림에서는 4단계이다). 농축될 용액으로부터 전개된 증기는 두 번째 증발기



[그림 7] 일본 슈퍼히트펌프의 고효율가열 히트펌프의 계통도

러한 놀라운 결과에 도달하기 위해서 다음의 개발이 채택되었다. 즉, 다양한 압력과 온도를 갖는 3개의 응축기에서 이루어진 다단계 응축과정, 압축가스를 냉각하기 위해 분사액체주입을 하는 고효율 다단계 원심압축기, 그리고 응축기, 증발기, 부수적인 냉각기 등 새로 개발된 고효율 열교환기 등이다. 새로운 히트펌프의 계통도를 [그림 7]에 나타내었다. 이 모



[그림 8] 에젝터를 이용한 4단계농축공정

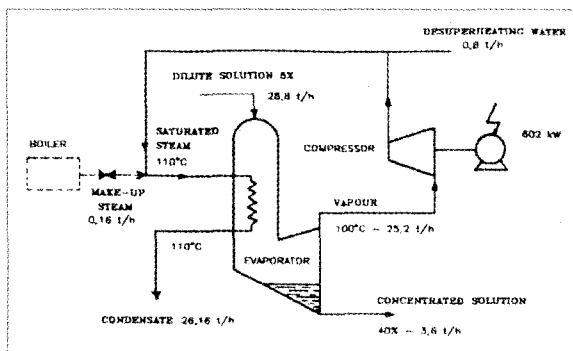
를 가열하는 S자곡선내에서 응축된다. 이 공정은 가장 낮은 압력과 온도에 있는 마지막 증발기에 까지 진행하고, 그로부터 농축된 용액은 추출된다. 첫 번째 증발기는 농축된 용액을 받으며, 그리고 그것은 보일러에서 발생된 증기로 구동된다. 에젝터는 첫 번째 증발기로부터 증기를 재압축하므로 보일러로부터 증기수요를 감소시켜 성능을 향상시킨다.

[그림 9]는 기계적인 증기재압축시설을 설명하는 것으로, 여기서 보일러는 시작할 때에 증기를 만들기 위해서만 필요하다. 기계식 재압축은 100°C의 증발온도로부터 110°C의 응축온도까지 증기의 온도범위를 올리고, 그래서 물겨된 용액은 가열될 수 있다. 증기재압축에 필요한 기계적인 에너지는 응축에 의해 얻어진 열에너지와 관련해서는 작다. 예를들면, [그림 9]에서 기계적인 동력은 0.6MW인 반면, 얻어진 열에너지는 약 19MW이다. <표 2>는 배출기와 일종효율기계식 재압축이 있거나 없고, 일종 또는 다종효율증발기를 비교하여, 증발된 물의 1000kg당 증기, 전기와 1차에너지의 소비를 나

타낸 것이다. 증기재압축은 증류 또는 건조공정에도 유사하게 사용될 수 있다. 공정용 증기자체의 사용은 작동유체의 안정성문제를 해결하지만, 압축기에 어려운 문제점을 발생시킨다. 사실 증기는 매우 부식성이 있을 수 있으며, 압축기는 부식성 증기에 견딜 수 있는 재료로 제조되어야만 한다. 또한 증기는 포화상태로 되고, 그래서 기계의 부품을 부식시키는 액체입자가 쉽게 형성될 수 있으며, 국부적인 속도는 액체트랩을 설치하

증 발 기 종 류	증발된 물 1000kg 당 증기량(kg)	증발된 물 1000kg당 kWh	증발된 물 1000kg당 1차에너지(MJ)
1종효율	1100 ~ 1300	10 ~ 20	2858 ~ 3466
2종효율	630 ~ 670	5 ~ 10	1629 ~ 1783
3종효율	400 ~ 450	3 ~ 7	1032 ~ 1200
4종효율	300 ~ 340	3 ~ 7	782 ~ 926
5종효율	240 ~ 260	3 ~ 7	632 ~ 726
에젝터부착 1종효율	450 ~ 550	3 ~ 7	1157 ~ 1450
에젝터부착 2종효율	150 ~ 230	3 ~ 7	407 ~ 651
에젝터부착 7종효율	105 ~ 125	3 ~ 7	295 ~ 388
기계식 증기재압축	0 ~ 20	13 ~ 25	140 ~ 320

<표 2> 여러장치에 대한 증발농축의 에너지소비율



[그림 9] 기계식 증기재압축 공정

고 적합한 재료를 선택하여 제한하여야만 한다. 증기는 압축 때문에 과열후 장치내에 침전시킨 미립자나 용질을 함유할 수 있으며, 그래서 청결한 구조를 마련하는 것이 가끔 필요할지 모른다. 윤활유와 증기의 접촉이 가끔 수용되지 않으므로 원심식 압축기가 더 좋으며, 스크류압축기가 사용한다면, 두 개의 스크류 건식압축기가 선택된다. 유럽에는 1987년까지 총용량이 267.4MW인 433기의 기계식 증기재압축시설이 있으며, 그들 중 3분의 2는 1979년후에 설치되었고, 40%는 식품산업체와 화학산업체에 있다. 구동원은 89%의 전동기, 8%의 증기터빈 그리고 3%의 내연기관이다. 원심식 압축기가 시설중의 80% 사용되었지만, 내연기관에 의해 구동되는 스크류압축기를 사용하는 경향이 있다.

다음호에 이어서...