

증기열원의 효율적 사용방안에 대한 연구 및 적용

주제 : 응축수 출구제어의 실현방안

이 인 구

개요

에너지 절약차원에서 증기의 효율적인 운용을 생각해보면 증기 생산공정, 이송, 사용공정으로 나누어 생각할 수 있다. 증기생산공정에서의 에너지절약은 보일러의 완전 연소에 가깝게 하기 위한 저과잉공기공급연소를 기본으로 하고 부하 증감에 따라야하는 연료와 연소용공기와의 비율과 선행관계, 연도로 나가는 폐가스의 고열을 회수하는 절단기(economizer)의 운영, 과열기(superheater)의 설치, 적절한 량의 Blow-down과 그에 대한 폐열 회수 등의 보편화된 기술이 적용되고 있으며 선진국에서는 증기 이송을 위한 특수 증기유로(steam channel)이 개발되었다고 한다.

에너지 절약차원에서 본다면 위의 세 부분 중 증기 사용측(user측)에 보다 많은 잠재력이 있다고 할 수 있지만 이 분야에 발전이 늦어진 원인으로는 공정의 중요성에 밀리어 응축수 회수는 하나의 유틸리티(utility)개념을 벗어나지 못했고 증기와 응축수 분리는 특수장치가 반드시 필요하다는 고정관념이 아닌가 생각된다. 물론 드랩(trap)이 반드시 필요한 경우도 적지 않다고 할 수 있다.

응축수 회수 방법에는 대체적으로 세 가지로 분류할 수 있고 그 중에서 중력식 회수가 제일 무난하지만 에너지 다소비와 이송문제, 산소 부식차원에서 본다면 그 한계를 벗어나기는 어려운 것이 사실이다.

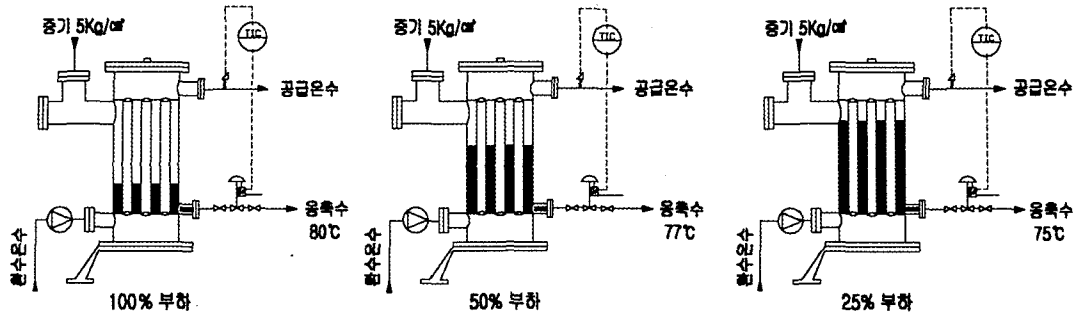
본 설명에서는 증기사용 측에서의 효율적인 열량 사용방안으로 응축수 회수를 공정 온도제어와 관련해서 설명하고 나아가서 응축수 회수계 전체와의 관계와 보다 유리한 조건이 있는가에 대해서 설명하기로 한다.

우선 응축수 회수방법에는 진공식회수, 중력식회수, 압력식회수의 세가지방법이 있으며 본 설명의 주제인 응축수 출구제어는 기존의 압력식회수의 많은 제약과 한계를 극복한 것으로 열 이용도에 대한 새로운 생각, 제어기술, 제어밸브의 발전과 그 선정에 대한 기술(Kd=공동현상지수의 산출, Cv값의 정확한 계산), 서로 다른 응축수 압력에 대한 결합 기술 등의 종합적인 설계로 개발된 기술로서 시스템의 단순화, 저온/고압회수, 산소 부식의 격감 등에 우수하다는 것이다.

그 반면에 기존의 진공식회수, 중력식회수에는 증기와 응축수를 분리시켜야하는 특수장치인 트랩 등이 있어야하며 이러한 기구를 통과하는 응축수는 포화온도에 가깝고 그 후단이 진공이거나 대기압에 가깝게되는 경우가 많아 일반적으로 고온/저압회수라는 약조건 때문에 에너지 다소비, 물리마모, 원거리이송문제, 산소부식 등에서 벗어나는 데에는 한계에 와있다 할 수 있다.

응축수 출구제어의 원리

응축수 출구제어는 열장비의 전열면적 충분조건 하에서만 가능하며 만약 충분치 못한 경우나



〈그림 1〉 전열면적제어에 의한 부하제어

회전식 건조기(rotary dryer)의 경우에는 증기 가속기술이 적용될 수 있다.

우선 응축수출구 제어의 원리설명을 쉽게 하기 위하여 〈그림 1〉과 같이 열장비 중에서 직립형 셸(shell) 측 증기 인입형 열교환기를 중심으로 설명하면 일반 난방 열교환기 증기 인입측에 5Kg/cm²의 증기를 공급하는 경우 열교환기 1차측에는 종래의 제어밸브가 없게되고 열교환기의 후단 즉 트랩이 있던 곳에 공정온도 제어용 “응축수 출구제어밸브”가 설치되며 증기와 응축수의 분리장치가 없다는 것이다.

구체적으로 설명해서 130%의 전열면적을 갖고 있는 열교환기에 100%의 부하가 요구될 경우 100%의 전열면적은 증기가 점유하고 30%의 전열면적에는 현열상태의 응축수를 함유하며 이때 열량은 적지만 고온상태에 있는 응축수는 피가열물인 환수(이차수)와 열교환하여 응축수 배출온도가 기존 시스템보다 많이 낮아지며 만약 공정조건이 변하여 부하가 50%로 변하면 제어기(temperature controller)는 목표치를 맞추기 위하여 PID제어로 밸브의 개도를 적당히 조절하게 된다.

이때 열교환기내의 응축수 함유량은 80%의 전열면적을 점유하고 증기는 50%의 전열면적을 갖게되어 부하변동에 의하여 실질적 가열면적 제어가 가능하게되고 이때 열교환기내에서 응축수 Cooling효과가 크게되어 배출 응축수온도를 75°C에서 80°C로 유지할 수 있다. 이 온도는 피

가열물의 인입 온도와 전열면적의 여유도에 따라 다소의 차이는 있으며 응축수 출구제어가 채택되는 경우 일반적으로 별도의 현열회수를 위한 폐열 회수장치가 필요 없고 회수 관로 상에는 어떤 형태의 증기도 존재하지 않는다. 또한 공정상 응축수온도가 고온/고압을 벗어날 수 없는 경우 응축수를 팽창시켜 폐열을 회수하는 경우에도 그 진단은 응축수 출구제어를 사용하는 것이 단연 우수한 결과를 얻을 수 있다.

설계의 용이성과 기존 시스템에 대한 전환

아무리 우수한 시스템이라 해도 설계의 난이도가 크다든지 기존방식과의 공용이나 전환에 기술적 어려움이나 투자에 무리가 따른다면 그 효용가치가 없다고 할 수 있다.

그러나 앞에서 설명한 바와 같이 제어형 압력식폐회로의 완성(응축수 출구제어)은 제어밸브의 선정이나 그 위치 변경 자체로 완성되는 것은 아니지만 증기공급과 응축수 회수계 전체에 대한 관찰이 선행된다면 계 전체를 단순화시킬 수 있어 설계가 용이하고 기존의 계를 본 응축수 출구제어계로의 전환이 용이하며 신설의 경우에는 투자측면에서도 유리하다.

즉 공급 증기압력의 높은 쪽으로의 통일 내지

단순화, 서로 다른 응축수 압력의 결합기술, 증기 압력과 응축수 압력의 균형제어 등으로 광범위한 증기사용공정에 제어형압력식 폐회로 회수가 가능하게 되었다.

응축수 출구제어의 국내 사례

국내에서 응축수 출구제어로 큰 실효를 거둔 모 기업의 3개공장 예를 <그림 2>의 공정도(P&I)를 가지고 설명한다.

우선 잠열이용도 측면에서 볼 때 종래의 개념보다 유리한 방향으로 수정된 의미가 크다는 것이다. 기존의 열 이용도 설계에서는 공정상 온도에 영향을 주지 않는 한도 내에서 증기의 압력을 낮게 설계하는 것이 원칙이었다. 그러나 전열면적이 충분할 때 이를 활용할 수 있는 응축수 출구제어로 공정온도를 제어하는 경우 증기공급 압력을 통합하든지 단순화하면 열 이용도가 종래 보다 개선된다.

공정도에 표시된 바와 같이 열풍온도가 제일 낮은 구역은 120°C이고 제일 높은 구역은 170°C로 증기 공급압력을 13kg/cm²로 하고 온도가 낮은

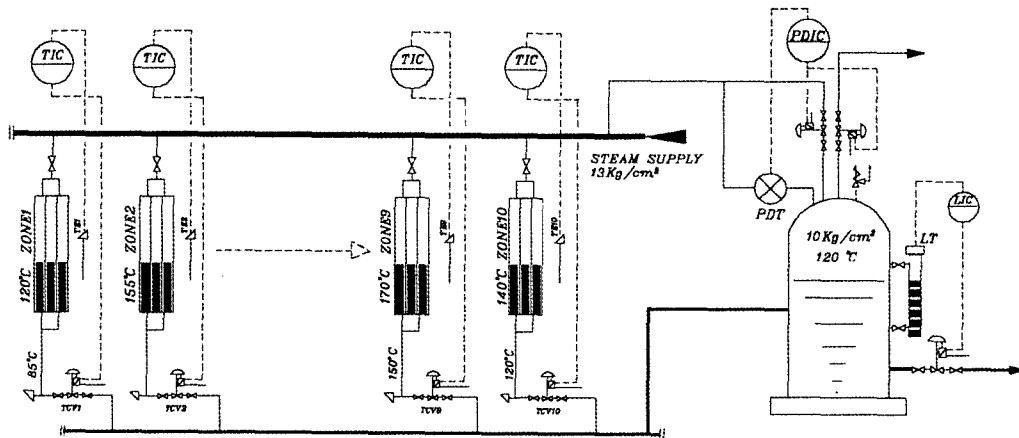
구역에도 증기 공급측에 감압밸브(pressure reducing valve)를 사용하지 않아도 잠열이용도가 기존 시스템보다 우수하여 120°C 구역의 응축수 배출온도가 85°C로 되었다.

시스템의 단순화 측면에서 보면 감압밸브, 증기트랩(펌프트랩 포함)을 사용하지 않았고 수동 바이패스 밸브수도 줄일 수 있었으며 보수유지비, 운전단가의 절감과 특히 안정성에서는 증기 공급압력과 응축수 배출압력이 부하와 1차 증기 압력의 변화에 관계없이 항상 균형($\Delta P=3\text{kg/cm}^2$ 유지)을 유지할 수 있어 그 우수성이 입증되었다.

시스템 전환시 우려되는 사항의 해설

회수응축수의 결합

낮은 압력의 응축수를 높은 압력의 응축수쪽으로 결합하는 경우 하이드로 이젝터(hydro-ejector)를 사용할 수 있으며 이 경우 응축수 중에 이증가스가 없어야 하고 응축수 출구제어의 경우는 관로 상에 이증가스가 없는 것이 특징이므로 서로 다른 압력사이의 결합에 문제점이 없다.



- * 장거리 이송 용이
- * Feed Pump의 흡입양정 개선
- * 증기와 응축수 압력의 균형

<그림 2> 응축수 출구제어에 의한 열풍건조기 적용

공동현상/플레싱(flushing)

포화상태 혹은 고온상태에있는 응축수가 급격한 압력강하가 있는 경우 국부적으로 기포의 발생과 붕괴가 있을 때 충격파를 수반하면서 진동과 물리마모가 일어나는 현상이 공동(cavitation) 현상이다. 응축수압력이 증발압력이하로 떨어질 때 액체상태로 환원되지 않고 기체상태를 유지하면 플레싱이다. 이들의 강약지수를 Kd로 표시할 수 있는 수식이 있지만 어떤 공정을 모사 할 때 수많은 Kd 값을 도출해 볼 필요가 있으므로 Kd 값을 프로그램화하면 밸브의 압력차 설정에 중요 변수가 되는 응축수 회수조의 압력설정에 완전을 기할 수 있어 공동현상을 배제할 수 있다. rdhehdgus상과 플레싱은 다음과 같이 구분되며,

$$Kd = (P_1 - P_2)/(P_1 - P_v) \text{에서}$$

$Kd \geq 0.65$: 공동현상

$Kd \approx 1$: 플레싱

여기서 P_v 는 증기압이다.

수격현상

수격현상은 열장비내의 증기부분에 이종가스(주로 공기)가 있는 경우 이종가스가 공극을 이루고 이것을 중심으로 응축과 팽창이 반복될 때 초기에는 노킹(knocking)으로 시작되며 이것이 확대되면 수격현상으로 발전하는 것이다.

그러나 응축수출구제어의 경우는 증력식이나 진공식과 달리 완전 밀폐/압력식으로 이종가스의 침입이 불가능하여 수격현상을 완전히 배제할 수 있다.

온도제어의 응답성과 외란에 대한 우려

응축수 출구제어는 후단제어로서 전단제어인 증기제어보다 응답성은 다소 떨어지지만 온도제어 계는 다른 제어계에 비하여 시간지연이 크기 때문에 실제로 제어밸브를 통과하는 열매체의 량과 속도보다는 제어기의 미분동작(derivative-action, 예비동작)에 좌우된다. 큰 체적을 제어하는 경우 예를 들면 공조기로 대형홀

등의 온도를 제어하는 경우와 열풍온도를 제어하는 경우 복사온도 감지를 미리 할 수 있는 진진이송(feed-forward) 제어계를 구성하는 것이 필요하다.

실제 국내에서 증류탑의 온도제어도 응축수 출구제어로 아무런 문제가 없음을 증명되었다.

응축수 출구제어에 대한 에너지절약(10~15%) 산출 근거

에너지절약 비교표(1,000,000kcal/H기준)

- 사용조건(표 1 참조)

- * 사용증기압 : 13kg/cm²
- * 전열 : 665.73kcal/kg, 현열 : 197.402kcal/kg, 잠열 : 468.33kcal/kg
- * 온도허용오차 ±0.5°C
- * 설계용량 8,000kg/H(개선전 사용량 약 7T/H)
- * 개선후 사용량 : 5,950kg/H'

<표 1> 응축수 출구제어기법과 증력식 회수기법의 비교

	응축수 출구제어	증력식 회수
증기 압력	13kg/cm ²	13kg/cm ²
제어 형식	열교환면적제어/응축수량 제어	증기량 제어
응축수 온도	120°C	194.24°C
열량 이용율	545.73kcal/kg	468.33kcal/kg
증기 사용량	1,832.4kg/H	2,135.2 kg/H
증기 소모율	85.8 %	100 %
년간 연료금액	6T×10000원×6000H/Y = 3억6천만원	7T×10000원×6000H = 4억2천만원
년간 절약금액	6 천만원	
투자액	7 천만원	6천만원

부수적 효과

- 1) 트랩이 없어지고 Ogden 펌프나 기타 펌프의 가압장치 없이 응축수의 장거리 이송이 가능하다.
- 2) 장비의 증기입구측에 양력완밸브와 제어밸브가 없게된다.

〈표 2〉 응축수 회수방식의 비교

	압력식 회수 시스템(no trap system/개발된 방식)	중력식 회수 시스템(기존방식)
기본장단점	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Trap없이 응축수밸브로 공정온도를 제어 한다. ☞ 회수 응축수 온도가 저온/고압 이다. ☞ 수격현상이 없다. ☞ 펌프없이 원거리 이송이 가능하고 상향 배관이 용이하다. ☞ 산소포집이 매우적다.(밀폐식) ☞ 응축수배압이 일정하다. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 항상 트랩이 존재한다. ☞ 회수 응축수 온도가 고온/저압 이다. ☞ 수격현상이 있다. ☞ 가압장치가 필요하다. ☞ 응축수내에 용존산소가 많아 부식이 심함. ☞ 청관제 투입이 많다. ☞ 응축수배압이 항상 변한다.
Energy절약	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 에너지절약형(10% 이상 절약) <ul style="list-style-type: none"> * 응축수 온도 10-50℃ 낮음. * 재증발증기 / 플레싱 증기 없음. * 복사열손실이 적다. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 에너지 다소비형/부식형 <ul style="list-style-type: none"> * 응축수온도는 포화수상태로 높다. * 재증발 증기 / 플레싱 증기가 발생 * 복사열손실이 많다.
설비단가	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 밸브 100% ☞ 배관 90% ☞ 트랩 0% ☞ 응축수 탱크 밀폐식 120%(개방식인 경우는 동일) 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 100% ☞ 100% ☞ 100% ☞ 응축수 탱크 개방식 100%
운영단가	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 50% <ul style="list-style-type: none"> * 트랩 보수나 교체가 없다. * 배관 보수나 열교환기 보수가 적다. * 증기와 응축수 사이의 차압이 항상 일정하여 안정된 운전으로 잔고장이 적다. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 100% <ul style="list-style-type: none"> * 트랩 보수 및 교체작업이 많다. * 배관 보수와 열교환기 보수가 많다. * 응축수 배출의 불완전으로 인한 잔고장이 있을 수 있다.
수 명	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 40년 사용가능(열장비 코일, 자켓, 파이프) <ul style="list-style-type: none"> * 스케일과 산소부식이 적다. * 공동현상/플레싱이 일어나지 않아 물리부식이 거의 없다. * 열장비의 증기측에 응력이 없어 코일의 열화가 적다. * 수격현상이 없어 관이나 열교환기 파손 현상이 없다. ☞ 밸브수명을 트랩보다 5배 이상 연장 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ 20-25년(열장비 코일, 자켓, 파이프) <ul style="list-style-type: none"> * 스케일과 산소부식이 많다. * 공동현상/플레싱의 소지가 많아 트랩의 물리마모가 많으며 열장비의 증기측의 응축에 의한 응력이 심하여 열화가 빨리 일어난다. * 수격현상으로 인한 관 및 열교환기 파손 현상이 자주 발생한다. ☞ 트랩의 수명은 3년(조건에따라 다름)

- 3) 증증기가 배출되지 않고 회수관로과 회수 탱크에 재증발현상이 없다.
- 4) 열교환기의 증기측 내부압력이 일정하고 수격현상이 없으며 산소부식이 적다.
- 5) 공정온도제어 밸브는 응축수 배출측에 설치되며 이때 플레싱과 공동현상을 방지하는 응축수 회수 전용밸브를 사용하여 보수를 줄이고 수명을 크랩 사용시보다 수배 이상 연장할 수 있다.

기타

중력식의 경우 열교환기의 열교환 면적이 과다해서 응축수온도의 실측치가 이론치보다 낮은 경우도 트랩은 어떤 형태의 것을 사용하든 On-Off동작이기 때문에 수시로 “증증기”와 “재증 발 증기” 가 배출된다고 보아야 함으로 위의 절약 계산은 과다하다 할 수 없다. ☹