

증기 열교환 설비에서 여러가지 위터해머 현상 및 방지대책

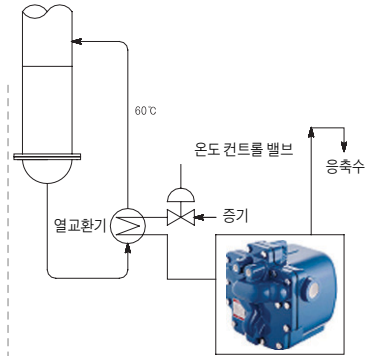
리 보일러(Reboiler), 증발기, 열교환기, 건조기 등 공정에서 증기를 가열용으로 사용하는 경우에 운전 조건이나 열교환 설비의 운전 특성을 잘못 이해하고 설계하는 경우에 위터해머의 원인이 되고 있다.

그 중에서도 컨트롤 밸브에 의해 온도를 제어하는 설비에서의 응축수 배출 정지 조건이 위터해머의 모든 원인이 된다고 할 수 있다. 이 경우에는 증기압력과 응축수 회수 시스템 압력의 불균형도 포함한다.

먼저 온도가 제어되는 설비에서 발생하는 응축수 배출 정지 현상에 대한 부분은 이미 스팀피플에서 여러 번 다룬 주제로서 특히 석유화학 공장에서는 공정의 증기 시스템의 설계가 식품이나 일반화학 공장과는 다른 산업 공장과는 다르게 압력 군별로 증기 공급을 하고 압력군 별로 응축수 회수를 하고 있어 응축수 배출 정지 현상이 빈번하게 발생하면서 동시에 위터해머가 발생하고 있다. 이와 같은 위터해머를 해결하기 위하여 현장 운전자들은 스팀트랩 다음에 설치된 드레인 밸브를 열고 운전함으로써 응축수 회수를 하지 못하고 있는 경우가 많다.

온도를 제어하는 설비의 응축수 배출 정지 조건

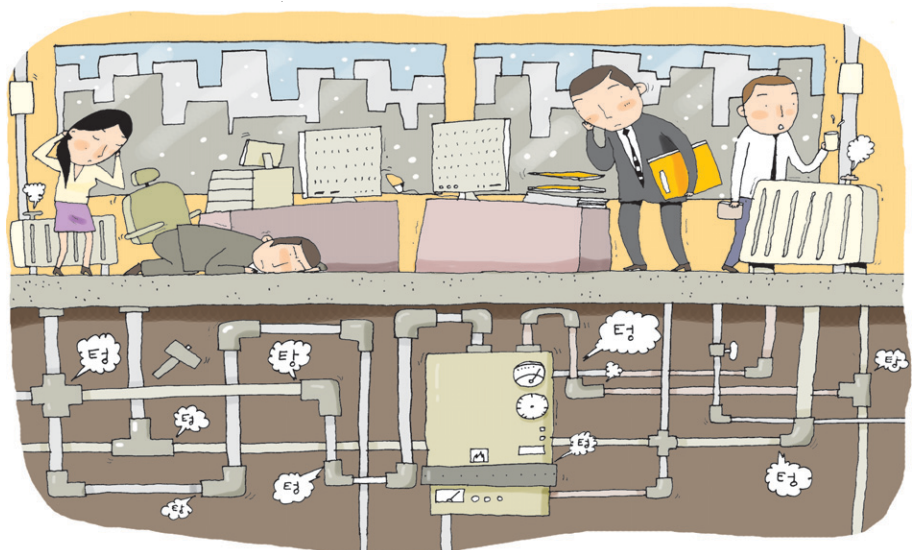
개략적으로 응축수 배출 정지 조건에 대해 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 40℃의 물을 60℃까지 가열하는 공정 가열용 열교환기에 2 bar g 증기를 공급하고 있다. 스팀트랩에서 배출된 응축수를 6 m 높이에 있는 응축수 회수 주관을 통해 100 m 거리에 있는 응축수 탱크까지 회수한다. 설계 조건대로 운전이 되면 열교환기 내부에는 압력이 1 bar g 이상이 유지되면서 응축수



가 원활하게 배출된다. 그러나 열교환기 입구 물의 온도가 50℃ 이상으로 상승하거나 물의 순환량이 감소하여 가열부하가 감소하게 되면 열교환기의 출구온도가 설정 온도 60℃

보다 과열되는 것을 방지하기 위하여 온도제어밸브 개도를 줄여 증기 공급 압력을 낮추게 된다.

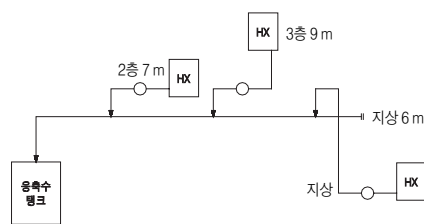
열교환기로 공급되는 증기 압력이 감소되면 열교환기 내부의 증기 압력이 감소되면서 압력이 0.5 bar g (증기포화온도 110℃)까지 떨어질 수 있으며 증기의 온도로 60℃의 물을 가열하는데 문제가 없다. 그러나 증기 압력이 0.5 barg 이므로 스팀트랩에서 응축수를 약 5m 까지 밖에는 상승시킬 수 없다. 결국 6m 높이에 있는 응축수 배관까지 응축수를 보내지 못하고 열교환기 내부에 응축수가 차오르는 응축수 배출 정지 조건이 발생한다. 아직도 증기의 온도가 높아 물의 가열이 계속된다면 온도제어밸브는 더욱 닫히게 되어 이제 압력이 대



기압 즉 100℃까지 떨어지게 되며 더 감소하여 진공조건까지도 떨어질 수 있다.

이제 배출되지 못한 응축수가 열교환기 내부에 차오르게 되어 전열면적이 줄어들게 되고, 열전달량이 줄어들어 열교환기 출구 물의 온도가 설정온도 60℃보다 떨어지게 되므로 밸브가 다시 열려 응축수를 배출하게 된다. 이때 진공 조건으로 유입되는 증기의 속도가 아주 빠르고 동시에 정제된 응축수 속으로 아주 빠른 속도로 유입된 증기가 상대적으로 낮은 온도의 응축수 속에서 빠르게 응축되면서 발생한 빈 공간 속으로 주변의 응축수가 서로 돌진하다가 부딪혀 발생하는 충격이 워터해머로 표현된다.

응축수 배출 정지 조건을 해결하기 위한 방안



가장 좋은 방법은 스팀트랩이 응축수 회수 탱크보다 높은 곳에 위치하고 있고 응축수 회수주관이 트랩보다 낮은 위치에 있어 스팀트랩에서 배출된 응축수가 중력에 의해 자연스럽게 응축수 탱크까지 흘러 내리도록 하는 것이다. 그러나 현실적으로 대부분 이렇게 시공을 할 수가 없으므로 문제가 된다.

위 그림처럼 증기 사용설비가 응축수 회수주관보다 높은 위치에 있다면 스팀트랩을 응축수 회수주관보다 높은 곳에 설치하는 것이 필수적이다. 그러나 대부분 스팀트랩의 설치위치가 응축수 회수주관보다 낮은 위치에 설치되는 것이 현실이므로 응축수 배출 정지 조건이 발생하는 경우에는 대기 개방형 응축수 탱크를 설치하고, 오그덴 펌프로 회수하는 방법이 있으나 이 방법은 재증발 증기 벤트로 인해 효율적이지 못하다.

따라서 밀폐식 오그덴 응축수 회수 펌프를 설치하여 응축수를 회수하는 것이 보다 효과적이다.

증기 압력과 응축수 회수 시스템의 구성에 따른 문제 발생의 사례

석유화학 공장의 경우 증기 공급 및 응축수 회수 시스템은 주어진 틀에 의하여 설계하고 배관을 함으로써 문제가 크게 발생하는 경우가 많다.

석유화학 공장의 경우 열병합 발전을 제외하고 대부분

본 공정은 증기 압력이 20 bar를 넘는 고압증기(HPS), 7~20 bar의 중압증기(MPS) 및 3~5 bar의 저압증기(LPS), 0.5~1.5 bar의 저저압증기(LLPS)의 주관을 각각 전 공장에 설치하고 필요한 위치에서 배관을 연결하여 증기를 사용하고 있다. 또한 이들 증기의 응축수는 각각 해당 압력별로 별도의 응축수 회수 주관을 설치하고 스팀트랩에서 배출된 응축수를 압력별 회수주관에 연결한다. 이 응축수는 다음 아래 단계의 증기를 발생하는 응축수 탱크로 회수된 후 이 탱크에서 재증발 증기를 회수하고 있다.

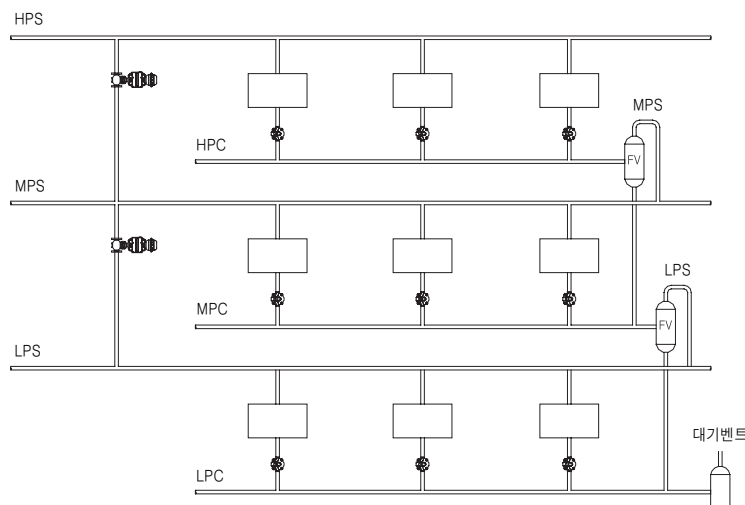
즉, 고압증기(HPS)의 응축수(HPC)를 회수한 응축수 탱크에서는 중압증기(MPS)를 발생시켜 사용하고, 중압증기(MPS)의 응축수(MPC)를 회수한 응축수 탱크에서는 저압증기(LPS)를 발생시켜 이용한다. 그리고 저압증기(LPS)의 응축수(LPC)는 대기압의 재증발 증기가 벤트되고 있는 대기 개방 탱크로 회수하는 경우가 대부분이고 경우에 따라서는 저저압증기(LLPS) 발생 탱크로 회수한다.

예를 들어, 고압증기(HPS) 압력은 35 bar g 이고, 중압증기(MPS) 압력은 11 bar g 이며 저압증기(LPS) 압력은 3.5 bar g 인 공장이 있다. 그러면 고압 응축수 (HPC)에서는 11 bar g 의 MPS 증기를 발생시키고 중압 응축수 (MPC)에서는 3.5 bar g 의 LPS 증기를 발생시킨다.

또한, 각각의 응축수 회수 주관은 지상에서 약 6~7 m 정도의 높이에 설치되어 있어 지상에 설치된 모든 스팀트랩에는 항상 0.6~0.7 bar g의 배압이 기본으로 걸리고 있다.

증기압력을 선정할 때는 공정의 온도를 고려하여 적절한 온도차이가 있는 증기 압력을 정하게 된다. 그리고 응축수 회수관은 당연히 압력 군별로 다음단계를 선정하게 된다.

응축수 회수관을 다음 단계로 회수하는 것은 단순히 보면 증기 압



력과 응축수 회수관의 압력 차이로 볼 때 충분한 압력차이가 있으므로 별 신경을 쓰지 않고 선정한다. 그러나 실제로 증기 사용설비 즉 열교환기 및 리보일러의 내부 증기공간에 걸리는 압력은 온도제어 밸브 1차측 증기압력이 아니라 부하에 따라 온도제어밸브에 의해 변동하는 증기 압력(온도제어 밸브 2차측 압력)이 된다. 이 때 증기 압력은 공정 온도에 해당하는 포화 증기 압력까지 떨어지거나 응축수 배관에 걸리는 배압을 이겨낼 수 없을 정도로 떨어지므로 열교환기 출구측 응축수 회수관내의 압력이 높게 되는 경우에는 응축수 배출 정지 조건이 발생하여 워터해머가 발생한다.

공정 운전온도와 최소 응축수 회수관 압력

재증발 증기 회수 압력	재증발 증기 및 배압 포화온도	최저 공정 온도
HPC → MPS (11 kg/cm ²) + 7 m	190 °C	190 °C
MPC → LPS (3.5 kg/cm ²) + 7 m	153 °C	153 °C
LPC → 대기개방 (7 m)	115 °C	115 °C

공정의 온도가 충분이 높은 경우에는 응축수 배출의 문제가 없지만 공정온도가 저압증기의 포화 온도와 비슷하거나 약간 높은 경우에 문제가 발생하게 된다.

사례 1. HP 증기의 응축수를 MP 증기 발생 드림으로 회수하는 경우

1) 설계 조건 : MP 증기 압력이 11 bar g(188°C)이고 공정온도가 185°C 인 경우에 MPS를 사용하지 못하고 압력이 30 bar g, 300°C 과열증기인 HPS를 사용하도록 설계하였다. 기본 설계 기준에 따라 응축수는 MPS를 발생하는 HPC 응축수 탱크로 연결하였다.

2) 운전조건에 따른 조건변화 : 공정에 공급하는 증기의 압력과 온도는 30 bar, 300°C이지만 공정이 운전되면서 실제로 운전되는 증기 압력을 보게 되면 응축수 배출점에서의 증기의 압력은 11 bar g~12 bar g가 되는 경우도 많다. 그 이유는 리보일러 등의 전열면적이 충분하게 크게 선정되고 부하가 낮은 경우에는 리보일러 내부의 증기 압력은 거의 공정온도에 해당하는 포화압력까지 감소한다. 이때는 배압이 증기 압력보다 높게 되므로 응축수 배출 정지 조건이 발생하고, 부하가 다시 증가하게 되면 정해진 응축수에 의한 증기의 급격한 응축으로 인한 워터해머가 발생하게 된다.

3) 개선방안 : 이때는 공정온도가 충분하게 높으므로 응축수 회수배관을 MPS 발생 응축수 탱크로 보내지 말고 LPS를 발생하는 응축수 탱크로 회수하는 것이 필요하다. 즉 무조건 HP 증기의 응축수를 다음 단계인 MPS 발생시스템으로 보내지 않고 공정 온도조건을 검토하여 그 다음 단계인 LPS 증기 발생시스템으로 회수하는 것을 검토한다.

사례 2. 공정온도가 100~120°C인 경우

1) 설계조건 : 앞의 경우와 비슷한 사례가 공정온도가 100~120°C 사이의 공정에서 많이 발생한다. 열교환기의 설치면적을 줄이기 위하여 증기 온도가 140~

150°C인 저압 증기(LPS) 대신에 온도가 175~190°C인 중압증기(MPS)를 기준으로 설계하게 된다.

2) 운전조건에 따른 조건변화 : 이때 최대 부하 조건에서는 문제가 발생하지 않는다. 그러나 부하가 감소하여 온도제어밸브가 닫히면서 증기 압력이 감소하면서 온도가 120~130°C인 1~2 bar g까지 압력이 떨어진다. 이때 응축수 회수 배관이 LPS를 발생하도록 연결되어 있으므로 배압은 약 2~3.5 bar가 되며 결국 응축수 정체로 인한 워터해머가 발생하게 된다.

3) 개선방안 :

- (1) 따라서 이때는 증기 압력이 7~20 bar g인 MPS이지만 응축수 회수를 LPS를 발생하는 MPC 탱크로 회수하지 말고 LPC 탱크로 회수하는 것이 필요하다.
- (2) 또는 증기 압력이 0.5~1.0 bar g인 LLPS를 발생하도록 하고 LLPS의 응축수를 대기 개방 응축수 탱크로 회수한다.
- (3) 또는 오그덴 응축수 펌프트랩을 설치하여 압력이 높을 때는 증기 압력으로 응축수를 배출하고 압력이 낮을 때는 펌프로 응축수를 회수하는 방법도 가능하다.

그러나 대기 개방 탱크로 비교적 높은 온도의 응축수를 회수하는 경우에는 응축수 탱크에서 벤트 증기의 양이 증가하므로 이 벤트 증기를 응축시켜 회수하기 위한 방안은 별도로 검토한다.

사례 3. 공정 온도가 100°C 미만인 경우

1) 설계조건 : 공정온도는 60 ~ 80°C로 100°C 미만이다. 주로 LPS 증기를 공급하고 응축수는 4 ~ 10m 의 높이에 설치된 응축수 회수 배관을 통해 대기 개방된 탱크로 회수한다.

2) 운전조건에 따른 조건변화 : 가장 전형적인 응축수 배출 정지 조건에 해당하는 응축수 회수 방식으로 문제가 되는 부분은 공정 온도가 100 °C 미만인 것이다. 이 경우 증기 공급압력을 10 bar g인 MPS 증기를 공급하거나 2 bar g ~ 3.5 bar g의 저압증기(LPS)를 공급하게 되는데 주로 저압증기를 공급한다. 열교환기의 부하가 떨어지면 전열면적이 상대적으로 커지는 효과가 있게 되는데 공정온도가 100°C 미만이므로 증기공간내부의 압력은 대기압 이하로 떨어지는 경우가 발생된다.

하지만 배압이 항상 0.6 ~ 0.7 bar g가 걸리고 있으므로 항상 응축수 배출 정지 문제가 발생하고 그에 따라 워터해머가 발생하므로 설비 보호를 위하여 많은 리보일러나 열교환기의 응축수를 회수하지 못하고 드레인하고 있다.

3) 개선방안 : 1차적인 방법으로 가능하면 리보일러를 2층 이상의 높이에 설치하고 스팀트랩도 응축수 회수 주관보다 높은 위치에 설치하여 응축수가 중력에 의해 응축수 회수관으로 유입되도록 하는 것이다.

그러나 스팀트랩을 지상에 설치해야 하거나 응축수 회수 주관보다 낮은 위치에 설치하는 것을 피할 수 없다면 가장 대표적인 해결방법이 응축수 회수를 위한 펌프트랩을 설치하는 것이다.

스파이렉스사코에서 제시하는 APT14 펌프트랩과 MFP14 및 볼후트 트랩의 조합이 펌프트랩의 예이다. 펌프트랩에 대한 자세한 것은 별도의 자료를 참고한다.