



이인구 고문
한솔지동화주식회사
ESCO사업부
ikee@hansol21c.co.kr

1. 응축수 출구제어 기술

가. 개요

증기의 사용공정 Cycle은 증기의 생산공정, 이송공정, 사용공정, 회수공정으로 나누어지며 에너지 절약차원에서 본다면 위의 세 부분중에서 사용공정과 회수공정측에 보다 많은 잠재력이 있다 할 수 있다. 또 사용공정측에서 보면 열장비에서의 잠열이용도에 새로운 아이디어가 등장했으며 응축수 회수측면에서는 증기의 자체운동력(Self-dynamic force)을 최대로 이용할 수 있는 압력식 폐회로회수방식이 범용으로 사용될 수 있게 개발되었다는 것이다.

나. 응축수 출구제어의 원리

응축수출구제어는 크게 두가지 의미로 나누어 생각할 수 있으며 그 첫 번째는 “열장비 내에서의 열이용도 개선”이고 두 번째는 응축수를 “저온/고압의 형태로 하여 압력탱크로 회수한다”는 것이다.

첫째, 증력식에서는 열장비 내에서의 응축가열은 피가열물에 증기의 잠열만 전달되고 현열은 응축수상태로 회수하게 되지만 응축수를 출구제어하면 열장비의 전 전열면적중 부하에 따라 증기와 응축수가 점유하는 전열면적이 자동적으로 변하게 된다. 따라서 최대부하시에도 응축수가 점유하는 전열면적은 30%(130%의 전열면적을 갖는 열장비의 경우)가 되고 30%가 갖고 있는 현열의 상당부분을 피가열물에 전달하게 되어 폐열열교환기를 사용한 것과 같은 효과가 있다. 기존의 개념은 잠열이용도를 높이기 위해서 증기압을 가능하면 낮게 사용하던 것이 위와 같은 결과에 의하여 달라졌으며 높은 압력을 사용하여도 오히려 열이용도를 높일 수 있는 경우가 많다는 것이다.

둘째, 응축수를 출구제어하기 때문에 열장비 내부의 증기압이 부하에 관계없이 일정하게 되고 그에 따라 응축수 배출압력이 일정하고 온도는 낮게 되어 “저온/고압”의 응축수 회수가 가능하게 되고 응축수 Tank를 압력 식으로 할 수 있어 기존의 “고온/저압”의 단점인 재증발(열방산과 대기로의 증기방출), Cavitation(물리마모유발로 증기누출), Flashing(물리마모와 열방산 손실)을 근본적으로 막을 수 있게 되었다는 것이다.

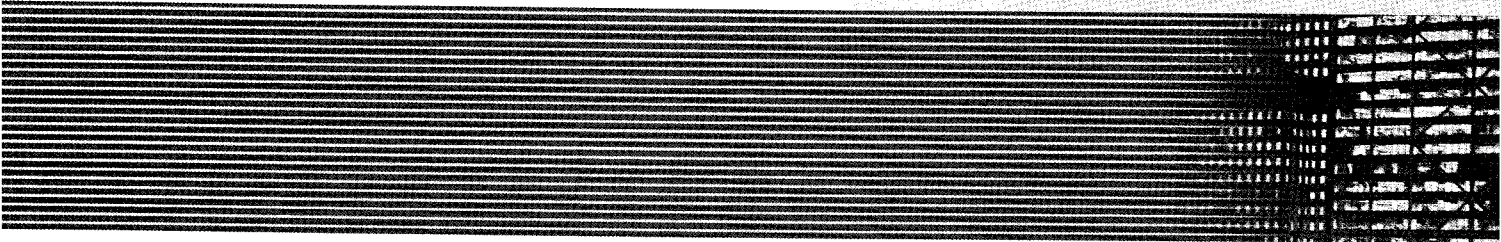
위와 같은 결과로 증기 Trap없이 응축수의 저온/고압 회수가 가능하고 별도의 응축수 이송장치 즉, OGDEN Pump나 기타의 원심 Pump없이 장거리 이송이 가능하게 되어 설비의 단순화와 Energy절감에 많은 도움이 될 수 있다는 것이다.

다. 응축수 출구제어의 실제

응축수 출구제어를 실현하기 위해서는 첫째 열교환기가 직립형이어야 하고, 둘째 열교환기의 전열면적이 충분(120%이상) 해야 하며, 셋째 응축수 탱크는 압력식으로 하고, 넷째 증기압력을 통일 내지 단 순화하면 된다. 아무리 큰 공장이나 복합공장(Complex plant)에서도 증기압력을 고압군, 중압군, 저압군의 세 가지로 단순화 할 수 있어 응축수회수 Tank를 세 개로 분리해서 최종 통합회수가 가능하다.

응축수 출구제어를 구체적으로 설명하면 직립형 Shell측 증기(5Kg/cm²)인입형 열교환의 경우 증기입구측에는 증기제어밸브가 없고 기존의 증기 Trap자리에 공정 온도제어용 밸브가 설치되며 Trap의 역할까지 하게 된다.

구체적으로 설명해서 130%의 전열면적을 갖고 있는 열교환기에 100%의 부하가 요구될 경우, 100%의 전열면적은 증기가 점유하고 30%의 전열면적에는



현열상태의 응축수를 함유하게 된다. 이때 열량은 적지만 고온상태에 있는 응축수는 피 가열물인 환수와 열교환을 하게 되어 응축수온도는 기존 방식보다 많이 내려가게 된다. 만약 공정조건이 변하여 50%의 부하가 요구되면 응축수제어밸브가 공정온도(온수 출구온도)를 맞추기 위해 응축수량(증기량과 동일)을 조절하게 되고, 그 결과 응축수량은 80%의 전열면적을 점유하게 되고 증기는 50%의 전열면적을 점유하게 된다.

즉, 부하의 요구에 응하여 열교환기 내에서 증기와 응축수의 전열면적이 자동적으로 조절되어 응축수 온도를 75℃(환수온도 50℃의 경우)정도로 회수할 수 있게 된다. 응축수 출구제어를 하게 되면 응축수 회수관로상에 어떤 형태의 증기나 Gas(공기 등)가 존재할 수 없고 위에서 설명한 바와 같이 특별한 경우를 제외하고는 폐열열교환기가 필요 없게 되어 응축수 탱크를 압력식으로 할 수 있어 재증발증기의 발생이 근본적으로 없게 된다.

또한 공정상 고온/고압의 응축수회수를 피할 수 없어 팽창 증발시키는 경우에도 그 전단은 응축수 출구제어를 하는 것이 단연 우수한 결과를 얻을 수 있다.

라. System 전환시 우려된다고 생각하는 부분 해석

• 응축수 배압문제

위에서 설명한 바와 같이 아무리 복잡한 공정도 세 가지의 배압으로 단순화시켜 응축수 출구제어를 하면 세 가지의 배압통일은 간단히 실현할 수 있다.

• Cavitation 현상(공동현상)/Flashing현상

포화상태 혹은 고온/고압상태에 있는 응축수가 급격한 압력강하가 있을 경우, 국부적으로 기포의 발생과 붕괴가 발생하며 이때 충격파를 수반하면서 진동과 물리마모가 일어나는 현상이 공동(cavitation)현상이다.

응축수 압력이 포화압력이하로 떨어질 때 증기가 액체상태로 환원되지 않고 기체상태를 유지하면 Flashing이다. 이들의 강약지수를 Kd값으로 표시할 수 있는 수식이 있지만 어떤 공정을 Simulation 할 때 수많은 Kd값을 도출해 볼

필요가 있으므로 Kd값 산출에 대한 Program이 필요하며 이 값에 의하여 응축수배압과 회수조의 압력을 설정하면 재증발현상, Cavitation현상, Flashing현상을 완전히 막을 수 있고 Back pressure device를 사용할 경우도 있다.

$Kd \geq 0.65$: Cavitation 시작

$Kd \approx 1.0$: Flashing

• Hammering 현상

수격현상은 열장비 내의 증기 부분에 이종 가스(주로 공기)가 있는 경우 이 가스가 Porket을 이루고 이곳을 중심으로 응축과 팽창이 반복될 때 초기에는 노킹(Knocking)으로 시작되며 이것이 확대되면서 수격현상으로 발전하는 것이다.

그러나 응축수 출구제어의 경우에는 완전한 압력 밀폐식이기 때문에 Porket이 없어 수격현상을 배제할 수 있다.

ex)안산도시개발로 열공급하는 비도텍 16Gcal 열교환기 2기(32Gcal) 수격현상 없음

• 온도제어의 응답성과 외란에 대한 우려

응축수 출구제어는 후단제어로서 전단제어인 증기제어보다 응답성이 떨어지고 증기의 압력변화에 대한 온도외란을 막을 수 없다는 것이 일반적 견해이다. 그러나 온도제어는 다른 제어(압력, 유량 등)와는 달리 시간지연이 대단히 크기 때문에 온도변화추세(Rate)를 빨리 감지할 수 있는 온도감지기의 분해능과 제어기(Controller)의 분해능, 그리고 제어기의 제어 Parameter인 PID의 적절한 설정에 좌우되는 것이 제어밸브를 통과하는 열매스(증기, 응축수)의 양과 속도의 빠름에 좌우되는 것은 아니다.

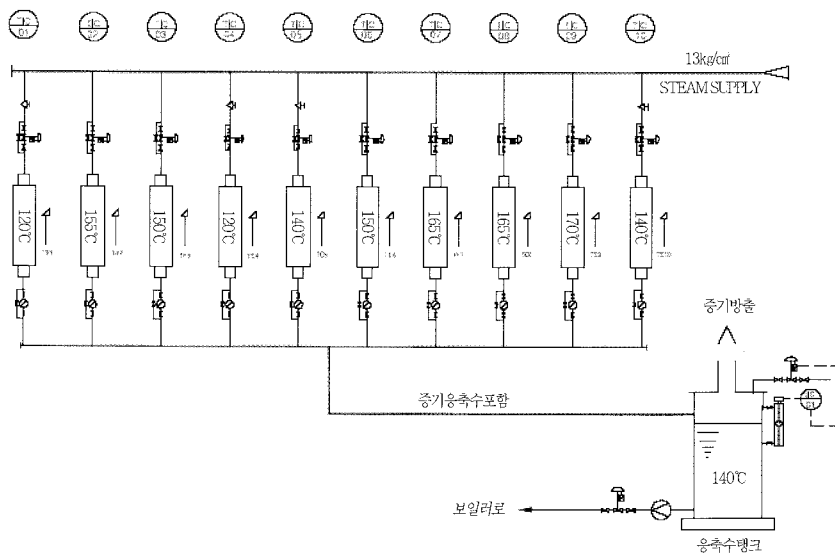
증기의 압력변화에 의한 외란문제는 증기압력 변동에 대한 응축수 탱크의 압력을 연동시켜 제어밸브를 통과하는 응축수가 증기압력변동에 의하여 변하지 않도록 압력 균형제어를 하기 때문에 기존의 압력변동에 대한 외란을 완전하게 보완했다 할 수 있다.

국내에서 증류탑의 온도제어를 응축수 출구제어로 완성시켰다.

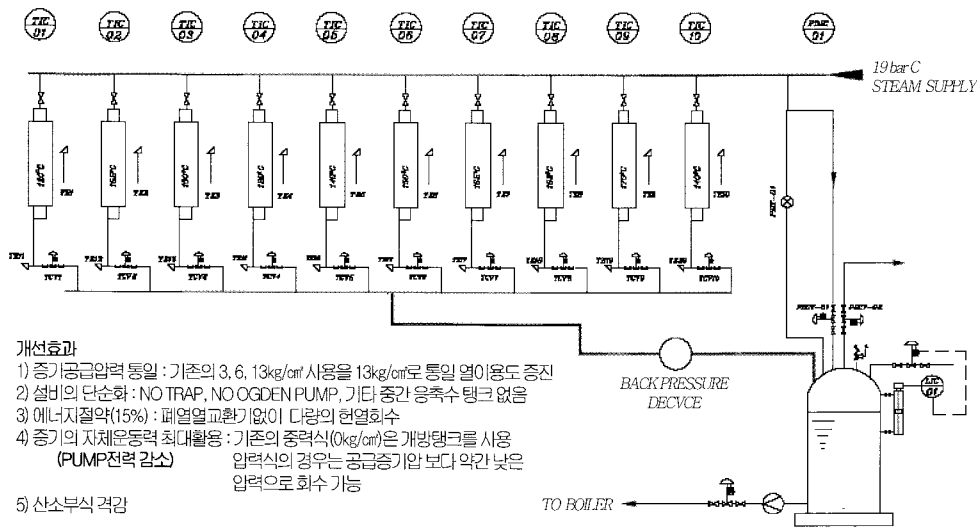
마. 응축수 회수방식의 비교

구 분	압력식 회수(개설된 방식)	중력식 회수(기존 방식)
장단점	<ul style="list-style-type: none"> • Trap이 없다. • 응축수 회수가 “저온/고압”이다. • 응축수 이송에 Pump가 없다. • 용존산소가 매우 적다. • 청관제 투입이 적다. • 수격현상(Hammering)이 적다. • 열장비 내부에 압력Stress가 없다. 	<ul style="list-style-type: none"> • Trap이 있다. • 응축수회수가 “고온/저압”이다. • 응축수 이송에 Pump가 필요하다. • 용존산소가 많다. • 청관제 투입이 많다. • 수격현상(Hammering)이 많다. • 열장비 내부에 압력Stress가 크다.
에너지절약	<ul style="list-style-type: none"> • Energy절약형(10%이상)이다. - 응축수 온도가 5 ~ 20℃ 낮다. - 재증발/플래싱이 없다. - 응축수 Line에 복사열손실이 적다. 	<ul style="list-style-type: none"> • Energy다소비형/부식형 이다. - 응축수 온도가 높다. - 재증발/플래싱으로 증기소모가 많다. - 응축수 Line에 복사열손실이 많다.
설비단가	<ul style="list-style-type: none"> • 밸브 단가 100% • 배관 단가 90% • Trap 단가 10% • 응축수Tank단가 150% 	<ul style="list-style-type: none"> • 밸브 단가 100% • 배관 단가 100% • Trap 단가 100% • 응축수Tank단가 100%
운영단가	<ul style="list-style-type: none"> • 50% - Trap보수와 교체가 없다. - 배관과 열교환기 보수가 적다. 	<ul style="list-style-type: none"> • 100% - Trap보수와 교체작업이 많다. - 배관과 열교환기 보수가 많다.
수 명	<ul style="list-style-type: none"> • 40년 이상 사용 - 산소부식과 스케일이 적다. - 물리부식이 거의 없다(제어밸브). - 열교환기 내부에 응력이 적다. - 수격현상이 적다. - 제어밸브수명은 Trap에 비해 약 4배 	<ul style="list-style-type: none"> • 20 ~ 25년 사용 - 산소부식과 스케일이 많다. - 물리부식이 많다(Trap부분). - 열교환기 내부에 응력이 크다. - 수격현상이 많다. - Trap수명은 4~5년 정도

증기/응축수 중력식 회수 SYSTEM (개선전)



응축수 출구제어 SYSTEM (NO TRAP/NO OGDEN PUMP/NO PRV) (개선후)



개선효과

- 1) 증기공급압력 통일: 기존의 3, 6, 13kg/cm² 사용을 13kg/cm²로 통일 열이용도 증진
- 2) 설비의 단순화: NO TRAP, NO OGDEN PUMP, 기타 중간 응축수 탱크 없음
- 3) 에너지절약(15%): 폐열회수율이 높아 다량의 현열회수
- 4) 증기의 자체운동력 최대활용: 기존의 중력식(0kg/cm²)은 개방탱크를 사용
입력식의 경우는 공급증기압 보다 약간 낮은
압력으로 회수 가능
- 5) 산소부식 격감

2. 제지 Drainage 공정에 대한 개선방안

가. 개요

초지기의 증기를 사용하는 Dry 공정은 대략 3군으로 형성되어있고 Cylinder의 표면온도의 순차적인 제어방법으로 각군(저압군, 중압군, 고압군) 및 군 자체에 대한 공급증기압력과 차압연동 System으로 되어 있다.

본 개선방안에서 제시하는 새로운 System은 군별 차압 연동 System을 그대로 유지하는 방법과 독립된 군별 제어 System으로 단순화할 수도 있으며 응축수 배출을 보다 원활하게 하여 Cylinder의 무게도 줄이고 신속한 온도의 상승과 표면온도의 고른 분포를 목표로 한 것이다.

국내에서도 증기 Compressor를 사용한 일부 개선이 있었으나 적용에 대한 전문성의 부족과 공급증기에 대한 압력 내지 과열도 문제로 전반적인 개선이 미흡하였으나 이와 같은 증기공급 문제만 개선된다면 증기 Compressor를 사용하여 Cylinder내의 증기 통과속도를 높임과 동시에 응축수 배출을 보다 효과적으로 할 수 있어 생산속도를 높이고 후렛트 탱크의 크기도 줄일 수 있다는 것이 국내에서 증명되었다.

나. 개선방안의 원리

제어형 3-Way 증기Compressor의 특수성을 이용한 기술로 Drainage System을 개선할 수 있으며 이는 증기의 공급 압력과 과열도(포장지의 경우 압력 : 8Kg/m²G이상, 온도 : 180℃이상)가 유지되어야 한다.

우선 각 군에 대한 증기공급을 기존의 2-Way제어밸브 대신에 증기 Compressor로 하는 경우 1차 측의 고압증기를 각 군에 대한 사용증기압으로 감압하는 과정에서 고압의 위치 Energy가 속도 Energy로 변환되며 증기 Compressor의 흡입측에 강한 부압이 형성되면서 각 Cylinder로부터 배출되는 증기와 응축수를 강력하게 빨아냄과 동시에 그 증기를 다시 자체 Cylinder로 되돌릴 수 있다. 이를 기초로 Drainage system을 보다 효율적으로 설계 할 수 있게 되었

다. 차압연동 제어방법을 개별 압력제어(온도제어)방법으로 단순화하면서 동시에 각 Cylinder내로 투입되는 Motive 증기량은 종래보다 적게 되고 총 증기량(Mo1+Mo3)은 증기됨과 동시에 증기속도가 증가하게 되어 Cylinder의 온도분포도가 고르고 빠르게 올릴 수 있게 되었다. 또한 응축수의 원활한 배출로 Cylinder내의 응축막을 줄임으로써 회전속도를 높일 수 있었다.

이 경우 증기 Compressor가 주 밸브역할을 해야 하고 보조 역할을 할 정도의 증기량을 제어하면 안 되며 65% 이하의 Opening(열림)이 되지 않도록 해야 한다.

이 System에서 정상운전 시에는 종래의 저압단을 위한 Condenser와 Vacuum Compressor의 가동도 필요 없게 된다.

보다 상세한 설명은 공정(P&I)도의 기술적 구성과 각 군에 대한 증기 Compressor의 “압축률”과 “팽창률”에 대한 성능계산에 의하여 설명되며 압축률이 낮고 팽창률이 높을수록 증기 Compressor적용에 유리하다.

물론 위의 “울” 계산에 앞서 선행되어야 할 것은 각 군에 대한 증기/응축수 Balancing(열평형)계산을 90% 이상 정확하게 해야 증기 Compressor의 적절한 선정이 가능하다.

$$\triangleright \text{압축률(CR)} = \frac{Po4 - Po3}{Po3}$$

$$\triangleright \text{팽창률(ER)} = \frac{Po1 - Po3}{Po3}$$

$$\triangleright \text{혼합률(U)} = \frac{Mo3}{Mo1}$$

$$\triangleright Mo4 = Mo1 + Mo3 = Mo1(1 + U)$$

여기서, Po1 : 1차 증기압(Motive Pressure)

Po3 : 흡입 증기압(Suction pressure)

Po4 : 토출 증기압(Discharge pressure)

Mo1 : 구동 증기량(Motive quantity)

Mo3 : 흡입 증기량(Suction quantity)

Mo4 : 토출 증기량(Discharge quantity)

혼합률(U)은 흡입능력을 나타내는 것으로, 압축률과 팽창률을 기초로 한 실험치로 각 Maker마다 그에 대한 성능곡선을 부분적으로 공표하고 있다.

다. 개선에 있어 필요한 요건

공급 증기의 개선 : 포장지의 경우

- a) 증기압력의 높임 : 포화증기 $7\text{kg}/\text{cm}^2 \rightarrow 10\text{kg}/\text{cm}^2 (183.3^\circ\text{C})$
 180°C 이상의 과열증기는 $8\text{kg}/\text{cm}^2$ 이상(Line 전체개선의 경우)
- b) 저압군에서 사용할 수 있는 재증발증기는 과다한 경우가 대부분이며 이 과다증기를 컨덴서가 아닌 다른 사용처가 별도로 있어야 함(저압군만 개선하는 경우)
- c) 각 압력군에서 나오는 배출증기를 각각의 자체군으로 되돌리기를 하여 저압군으로 넘어오는 증기를 줄여 최소화해야 함(Line 전체개선의 경우)

※공정도(P&I)와 열 Balancing 예는 당사에 별도로 준비되어 있음

라. 개선에 대한 이득

- a) 각 군에 대한 독립 압력제어도 가능 : 제어의 단순화, 각 군의 건조도 분포 조절가능
 - b) 각 Cylinder내의 증기량과 증기가속으로 내부 응축막 감소 : Cylinder의 표면온도 분포향상 및 빠른 온도상승
 - c) 각 Cylinder내의 응축수 배출향상 : Cylinder driving motor의 전력감소, 전열효과 상승
 - d) b, c항의 결과로 제지생산속도의 증가
 - e) Condenser와 vacuum pump의 운영 축소 : 증기와 전력 절약 - 절지 시에만 사용
 - f) 고압군, 중압군에 대한 Drain 팽창탱크의 volume 축소
 - g) 절지의 빈도 줄임
- ※한 line으로 두 종류 이상의 종이를 생산하는 경우 고압, 중압군의 증기 Compressor를 각각 두 대씩 설치하여 분할제어(Split control)할 필요가 있다.

즉, 박지를 생산하는 경우에는 두 개의 증기 Compressor중 한 개만 사용하고 80% 이상의 개도를 유지하여 Compressor의 최대효율을 발휘할 수 있도록 해야한다. 20% 이상의 증기를 되돌리기 할 경우 공급증기의 건조(과열도)를 고려해야 한다.

※저압군에서 증기 Compressor의 흡입능력을 기존의 Condenser와 진공 Compressor 사용시보다 개선하기 위하여 충분한 용량의 선정이 요구되며 이 때 초과증기량을 처리할 수 있는 기술적 설계가 요구된다.

마. 증기 Ejector의 사용처 분류 개략

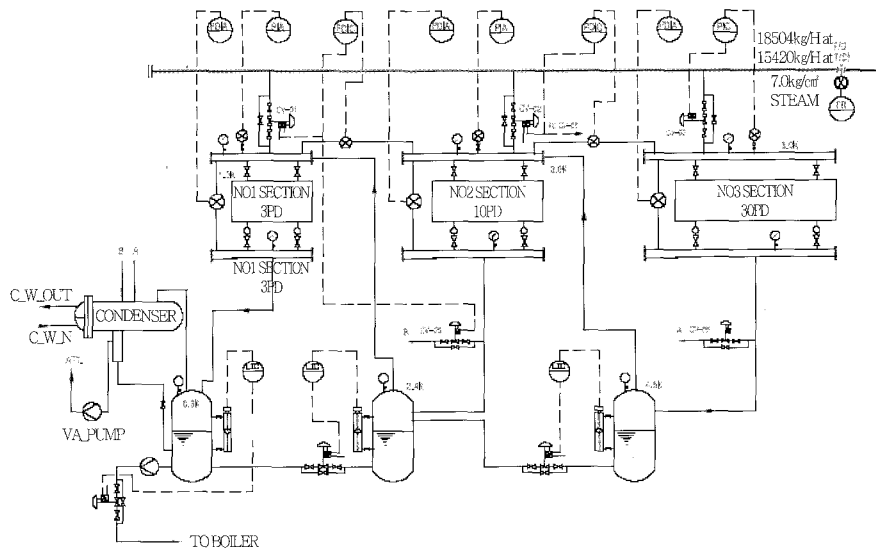
- a) 진공 분야 : 진공증발기 등 기타의 진공이 필요한 부분으로 Compression rate가 큰 경우가 많으며 고진공의 경우에는 Ejector와 Condenser를 직렬로 한 다단의 System을 사용하게 됨
- b) 일반 Boosting 분야 : Compression rate가 큰 경우로 기대효과가 적으며 고압의 증기로 저압의 증기를 흡수하여 중압의 증기를 만들어내는 경우로 큰 용량의 사용처가 있어야 함
- c) 열장비 효율증대 분야 : 열장비의 조건에서 Compression rate가 작을 때 증기를 장비 내에서 가속시킬 수 있는 조건이 좋아지며 기대효과가 비교적 크다 할 수 있으나 팽창률이 상대적으로 큰 경우에도 효과가 상승한다.
 예 : 용량 부족의 각종 열교환기
 (공급증기압이 충분히 높아야함)
 열장비의 용량이 충분하여도 압축률이 작고 팽창률이 큰 열장비

▶ 기대 효과 : 에너지절약

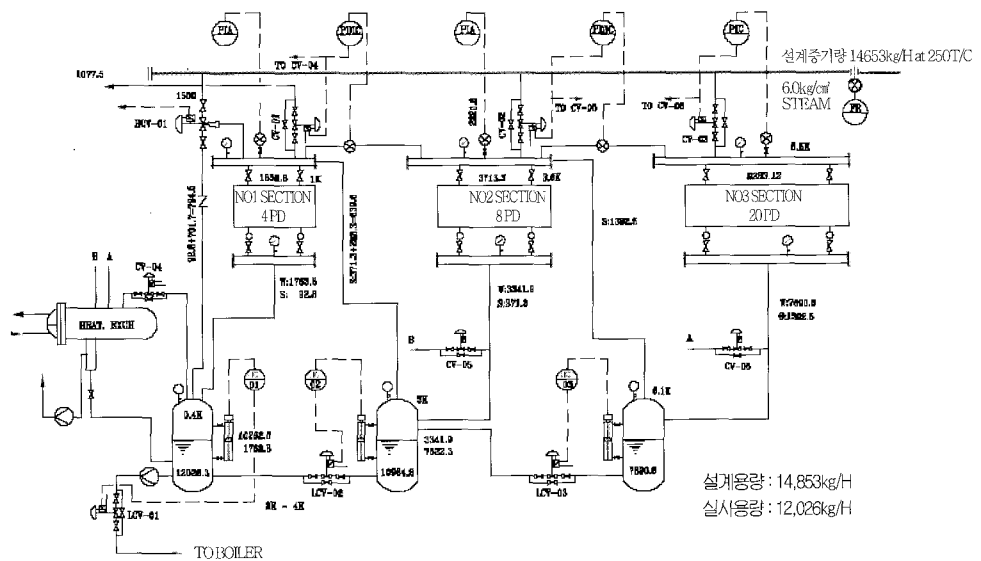
- ① 저압군에서의 응축수배출을 위한 Condenser와 진공 Pump의 운영이 필요 없게 된다.
- ② Cylinder의 Driving force(전력비)가 줄어든다.
- ③ 제지의 생산속도가 증가한다.

바. 설치 전후의 비교

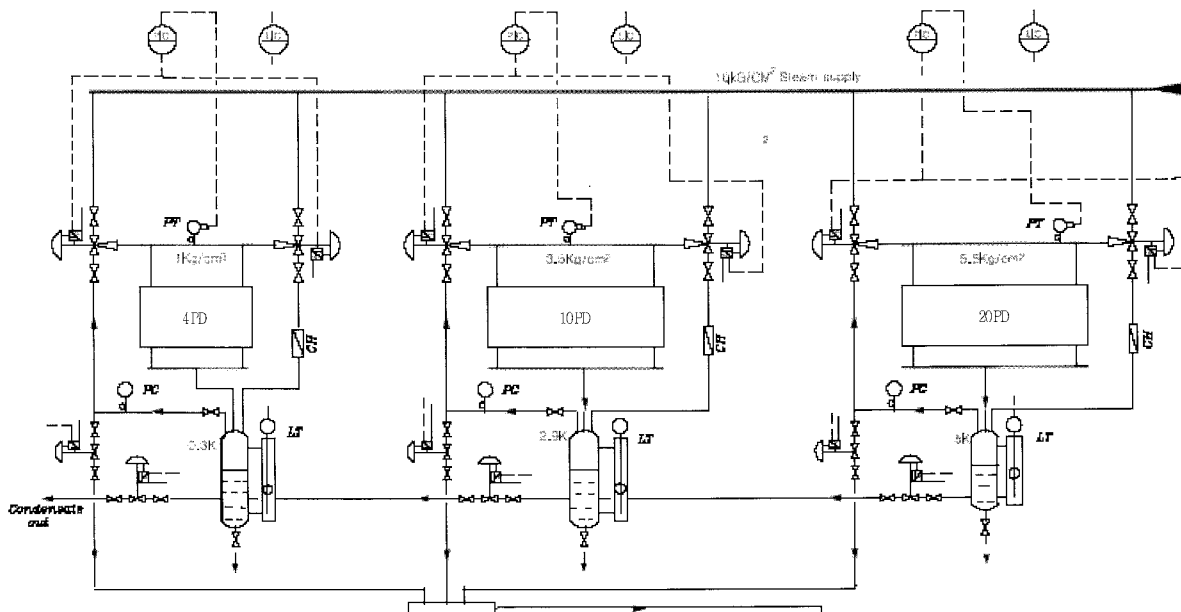
PAPER MILL
(개선전)



PAPER MILL
(개선후)



PAPER MILL PROCESS
(개선후 : LINE 전체개선)



개선의 요점

- 1) 기존의 차압방식에서 Them-compressor를 이용한 강력한 증기되돌리기 방식으로 전환
 - 2) 증기 되돌리기를 강화하여 증기의 건조도와 압력을 높였음
 - 3) Cylinder 나무의 응축막이 줄어들고 독립적으로 흡수 있음
- ※위의 Dvalhage 개선 예는 국내에서 증명된 예임

