

증기발생용 보일러의 자동화 기술

제 1 회

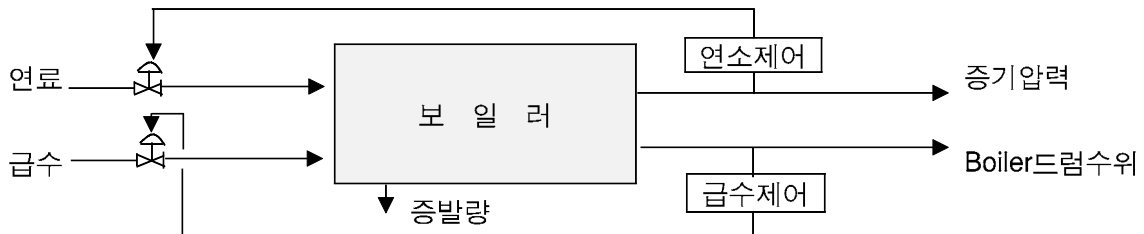
박 영 수

서론

증기발생용 보일러는 주로 산업용으로 많이 사용되고 있으며, 각 공장에는 최소한 예비용 설비를 포함하여 2대 이상이 설치되어 운영되고 있습니다. 운영자 및 관리자는 운영되는 증기발생용 보일러 설비를 일부분만이라도 효과적인 자동화설비로 구성하거나, 현재 운영되고 있는 설비를 보다 효율적으로 운영하여 에너지절약이라는 효과를 볼 수 있다면 얼마나 좋을까? 라는 생각을 해보신 적이 있을 것이라 생각합니다. 또한 운영하시는 분 대부분이 기계를 전공하신 분이라 자동화 관련 지식을 얻고자 노력하시는 분들을 만나게 되는 경우도 있었습니다. 여기에 자동화 기술을 기계설비와 연계하여 기술하며, 제어 분야 기술자들을 위하여 기계설비의 이해를 돕고자 합니다.

증기발생용 보일러는 크게 물의 증량 Balance와 열적 Balance가 상호작용으로 유지되는 프로세스이며 이는 크게 급수, 연료공급, 연소공기 및 배가스, 증기발생등 크게 4부분으로 분리할 수 있습니다. 전체를 자동화할 경우에는 상호 유기적으로 결합되어야 하겠지만 사용하고 있는 설비에 맞도록 부분적인 단독 자동화 시스템을 구성하여 효과적인 에너지 절약 시스템이 된다면 더욱 바람직한 방법이라 판단됩니다. 또한 부분적인 자동화 설계 시 전체 자동화를 고려한 설계를 하여 시공을 한다면 매우 효과적이라 할 수 있습니다.

| | 부 하 | 제 어 량 | 조 작 량 |
|---|-------------|-----------|------------|
| 물의 증량 Balance - 급 수 제 어 (FWC ; Feed Water Control) | 증 발 량 | Boiler 수위 | Boiler 급수량 |
| 열적 Balance - 연 소 제 어 (ACC ; Automatic Combustion Control) | 증기로 빠져나간 열량 | 증기압력 | 연료투입량 |



<증기발생용 보일러의 기본 제어개념>

본론

본론의 구성은 급수제어, 연료공급제어, 연소공기량제어, 보일러 주증기압력제어로 분리하며, 각 제어별 관련 기계설비 및 계측제어장치에 대한 사양 선정 및 제어방법에 서술하겠습니다.

1. 급수제어

제어개념은 부하에 따라 발생하는 증기량 만큼 공급되는 급수량을 조절하여 보일러의 드럼수위가 일정하게 유지되도록 하는 것입니다. 이를 사용하는 주목적은 양질의 스팀을 얻기 위한 것으로 보일러 드럼수위가 설정수위보다 높을 경우에는 발생증기의 질이 저하되고 과열관중에 스케일이 형성되는 등의 문제가 발생되며, 또한 수위가 설정수위보다 낮을 경우에는 보일러 관수의 순환성이 저하되어 과열로 인한 전열관의 부식 및 파열등의 위험을 초래합니다.

보일러에 있어서 급수제어방식은 검출요소에 따라 1요소식, 2요소식, 3요소식으로, 제어장치에 따라 전자식, 기계식으로 분류되어지며, 여기에 드럼 내 압력변동이 있는 경우에는 드럼내의 압력 및 부하율 등을 측정하여 효과적인 제어를 행하도록 구성합니다.

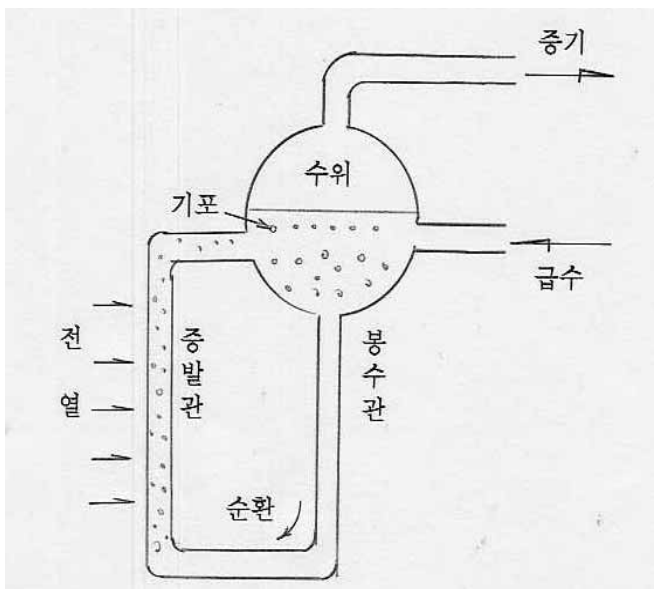
급수제어에 있어서 제어방식 및 제어장치의 선택은 보일러의 종류, 용량, 사용자의 제어범위 및 기타 외란 조건에 따라 가장 적합한 것을 채택하는 것이 바람직합니다.

수위의 동특성

보일러 드럼수위는 보일러내의 수량과 드럼수내의 기포량에 의해 결정됩니다. 여기서 생성되는 기포는 열공급량에 의한 증기 발생량과 더불어 발생하는 것이므로 기포의 양은 증발량에 비례합니다.

$$\begin{aligned} \text{보일러 드럼수위} &= \text{보일러 드럼내의 수량} + \text{드럼수내의 기포량} \\ \text{수내의 기포량} &\propto \text{열 공급량 (증기 발생량)} \end{aligned}$$

아래 그림은 보일러 드럼수위 특성을 설명하기 위한 모형도를 나타낸 것입니다.

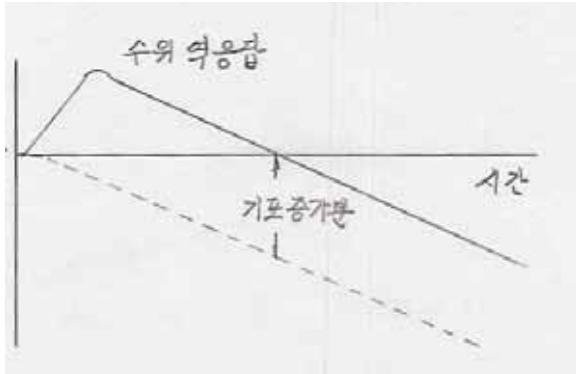


보일러의 드럼수위제어는 연소제어의 안정성에 따라 크게 변동이 발생합니다.

일반적인 연소제어 시스템에서는 중요한 3대 지연이 발생합니다.

- 1) 압력상승에 의해 연료량이 조절될 때까지의 압력추종지연이 있고,
- 2) 연료공급량이 조절되어 보일러 전열면의 전열량이 변화될 때까지의 연소실 지연이 생기며,
- 3) 전열량이 변화되어 발생증기압력이 변화될 때까지의 증발부 지연의 발생으로 크게 나눌 수 있습니다.

이러한 증기압력 추종에 의한 지연으로부터 보일러 드럼내의 에너지상태는 불평형을 일으킵니다. 만약, 증기 사용량(부하량)이 증가하여 보일러 드럼내의 압력이 감소하게될 경우의 드럼수내의 상태변화를 살펴보면 다음과 같습니다.



초기상태로서, 압력제어계가 즉시 추종하여 공기 및 연료공급량은 증가하였으나 아직 전열량이 증가하기 전까지의 드럼수내의 상태로, 드럼수내의 기포발생량이 거의 일정하여 드럼수위에는 큰 변동이 없습니다.

다음상태로서, 이제 부하증가에 따른 전열량이 증가하게 되는 상태로, 급수의 부족량보다 드럼수내의 기포발생량 증가가 크게되어 드럼수위가 일시적으로 상승하는 현상이 발생합니다.

마지막 상태로서, 전열량 증가에 따른 기포 발생량이

증가한 후의 상태로, 시간이 경과함에 따라 스팀 사용량보다 급수 공급량이 부족하게 되어 드럼수위는 점차 감소하게 됩니다.

앞서 설명한 바와같이 에너지 불평형에 의한 드럼수내의 기포량의 변화에 의해, 부하가 증가할 때 드럼수위가 일단 상승하는 현상을 수위의 역응답이라 합니다.

보일러 급수설비의 계측제어장치

수위제어의 기본 설비는 급수라인에 급수유량계 및 급수조절밸브가 설치되어야 합니다.

또한 제어방법별 설치되는 계측기의 종류는 다음과 같습니다.

| 프로세스 제어방식 | 급수라인 | 보일러드럼 | 증기라인 |
|--------------|---------------|---------|-----------|
| 1 요소 식 | 유량계, 조절밸브 | 수위신호발신기 | |
| 2 요소 식 | 유량신호발신기, 조절밸브 | 수위신호발신기 | |
| 3 요소 식 | 유량신호발신기, 조절밸브 | 수위신호발신기 | 증기유량신호발신기 |

1요소식 수위제어는 드럼수위만을 검출하여 수위변화에 따라 급수량을 제어하는 가장 간단한 제어방식입니다.



좌측 다이어그램에서 보는 바와 같이 수위발신기로부터 발신된 실제 측정값과 수위설정값을 비교하여 여기서 출력된 신호량에 의해 구동부(Control Valve)에서 급수량을 조절합니다.

1요소식 급수제어방식의 종류

- 1) 플롯식 수위발신기에서 발신된 신호에 의해 설정된 수위 조절범위로 운전될 수 있도록, 최고수위 (High Limit)와 최저수위(Low Limit)에서 펌프를 기동-정지(On-Off)시키는 방식으로 맥도날스위치, 플롯식 스위치가 사용됩니다.
- 2) 수위변동에 따라 플로트 이동 또는 열팽창관의 신축등에 의해 자동 급수밸브를 직접 조작하여 급수량을 조절하는 기계식 방식

3) 보일러 드럼 수위신호발신기로부터 발신된 신호량에 따라 자동 급수조절밸브를 구동시켜 급수량을 조절하는 방식으로 드럼수위차압신호발신기, 수위PID제어기와 조절밸브가 사용되는 전자식 방식

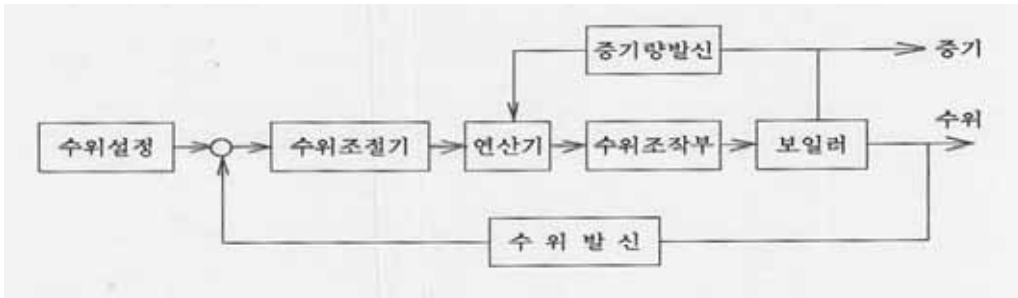
1요소식 급수제어방식의 적용

- 1) 정격 증발량에 비해 보일러의 드럼 용적이 커 수위의 변동이 심하지 않은 노통연관식 보일러
- 2) 부하변화율이 크지않아 압력변화가 적고 수위의 시정수가 큰 소용량의 수관식 보일러

만약, 부하변화가 큰 보일러일 경우에는 스팀 증발량의 수요변화에 대한 연료공급량의 추종 속도가 느리기 때문에 드럼내의 포화상태가 바뀌게되고 또한, 드럼수의 기포량의 변화가 커 수위의 역응답의 원인이 되어 수위의 오르내림이 심하게 됩니다.

따라서 이러한 1요소식 제어는 제어시스템이 간단하고 설비비가 저렴하여 부하변화율이 적은 보일러에는 적합하나, 부하변동이 큰 보일러의 경우에는 위험과 운전정지등을 초래할 염려가 있으므로 1요소식 수위제어만으로는 곤란합니다.

2요소식 수위제어는 드럼수위와 증기 증발량을 측정하여 급수량을 제어하는 방식이다. 이것은 드럼내의 스팀량을 측정하므로써 수위의 변동을 예측할 수 있습니다.



2요소식 급수제어방식의 종류

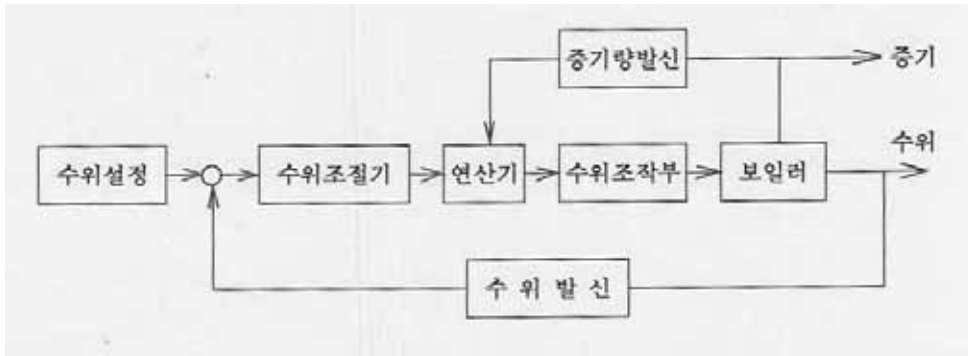
- 1) 수위변동 및 스팀량에 따라 열팽창관의 신축등에 의해 급수 자동밸브를 직접 조작하여 급수량을 조절하는 기계적인 방식
- 2) 수위센서로부터 출력된 신호량에 증기 증발량 신호를 받아들여 이를 급수요구량으로 활용하므로써 증기 증발량 알맞도록 자동 급수 밸브를 조절합니다.
(드럼수위차압신호발신기, 수위PID제어기, 증기량 신호발신기와 조절밸브가 사용되는 전자식 방식)

2요소식 급수제어방식의 적용

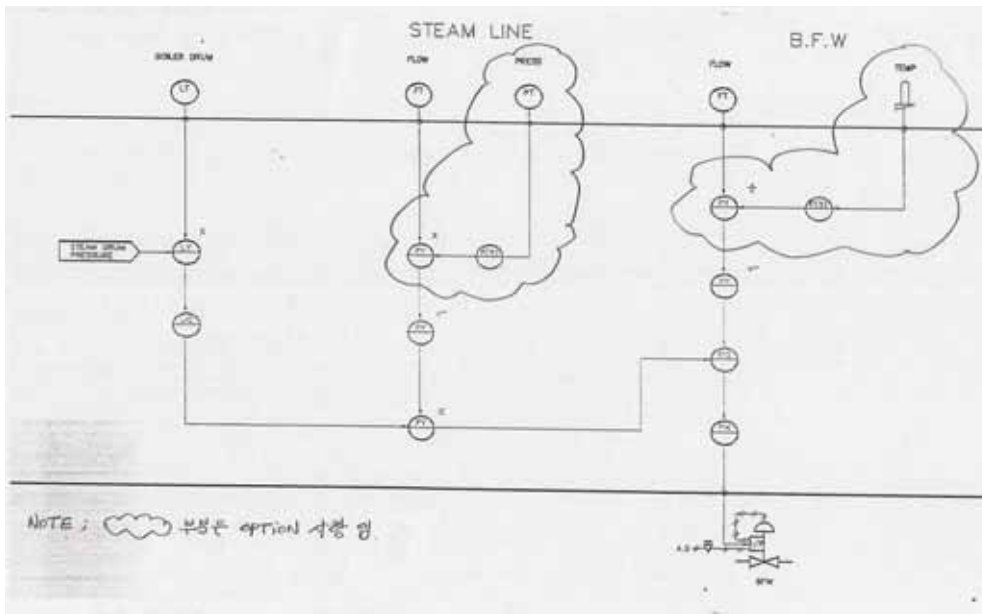
보일러의 부하변동이 비교적 적어 소규모의 역응답이 발생하는 중소용량의 수관식보일러에 적합합니다.

2요소식 급수제어방식의 문제점은 보일러에 공급되는 열공급량 변화와 스팀 발생량의 변화 사이에는 시간 지연이 발생되어 이에 따른 에너지 불평형으로 보일러 드럼내의 수위가 혼란을 일으킨다. 따라서 증기 발생량에 알맞은 급수량을 공급하기 위해서는 급수량을 측정하는 것이 좋습니다.

3요소식 수위제어는 드럼수위와 증기 증발량 및 급수량을 측정하여 급수량을 제어하는 고정도의 제어 방식이다. 2요소식에서는 급수량을 검출하지 않기 때문에 급수펌프의 회전수가 변동하거나 보일러내의 입력(연료량등)이 변화하는 등의 외란이 발생할 경우에는 밸브개도가 일정하더라도 급수량이 변화되는 등의 단점이 있기 때문에 이를 개선하기 위해 급수량을 검출하여 정밀한 제어를 행한다. 이런 경우에 스팀과 급수량 균형은 더욱 신속하게 조절되어 드럼내의 수량을 과도하게 변화시키지 않게됩니다.

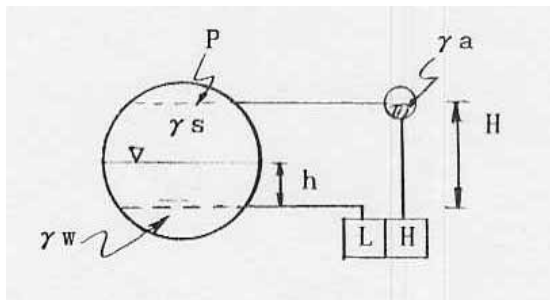


3요소식 수위제어의 수위조절기는 브루다운량, 급수열량의 변화, 급수밀도의 변화 등으로부터 발생하는 흐름의 불평형을 바로잡기 위해 서서히 조절되도록 하며, 급수조절기는 급수량과 증기발생량의 일정 상태를 항상 유지키 위해 빠르게 움직이도록 합니다.



증기발생량 -
급수유량 +
드럼수위 변화량
= 0 이 되도록
급수밸브 개도를
조정합니다.

드럼 수위신호발신기는 정상 압력으로 상시 유지한다면 수면계와 전자식 지시계는 동일 수위를 지시하나 휴지시, 승온 및 승압시에는 압력차가 발생하는 관계로 최대 10% 정도의 차가 발생합니다. 이에 따라서 드럼압력 변화에 따른 밀도차를 보상하여 전자식 지시계와 수면계의 차를 보상하는 것입니다.



- PH - PL : 신호발신기에 걸리는 압력 [ΔP]
- h : 드럼 수위 [mm]
- ΔP : 수위신호발신기의 차압 [mmH₂O]
- γa : Wet Leg Specific Weight [kg/m³]
- γs : Saturated Steam의 Specific Weight [kg/m³]
- γw : Saturated Water의 Specific Weight [kg/m³]
- H : Wet Leg의 높이 [mm]
- P : Pressure [kg/cm²G.]

$$P1 = P + \gamma_a H \quad P2 = P + \gamma_s(H - h) + \gamma_w h$$

$$\Delta P = P1 - P2 = \gamma_a H - \gamma_s(H-h) - \gamma_w h = (\gamma_a - \gamma_s) H + (\gamma_s - \gamma_w) h$$

$$h = \frac{\Delta P + (\gamma_s - \gamma_a) H}{(\gamma_s - \gamma_w)}$$

수위신호발신기에 걸리는 압력

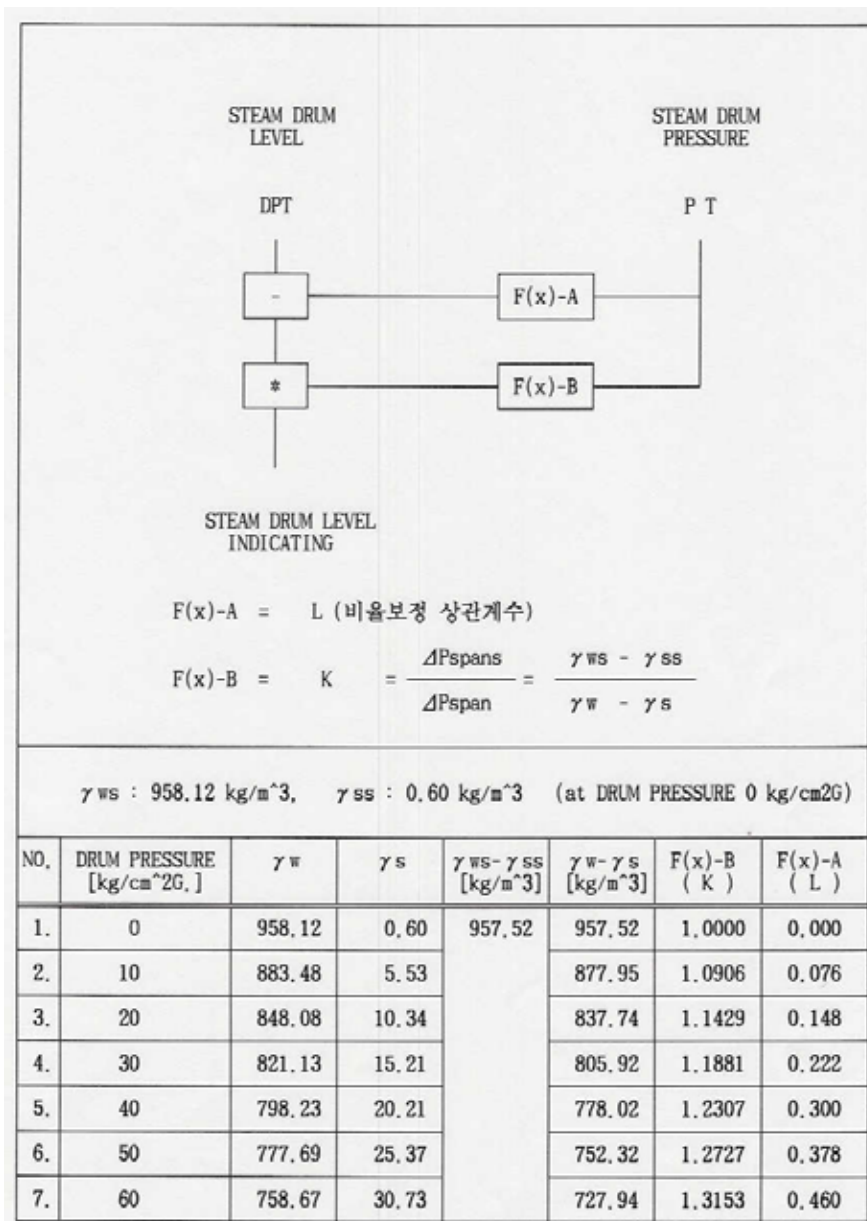
- 1) 최대차압 ΔP_{max} (at $h=0$) = $H (\gamma_a - \gamma_s)$
- 2) 최소차압 ΔP_{min} (at $h=H$) = $H (\gamma_a - \gamma_w)$
- 3) 수위신호발신기의 **Span** $\Delta P_{max} - \Delta P_{min} = H (\gamma_w - \gamma_s)$

$$\gamma_w - \gamma_s = \Delta P_{span} / H$$

$$\Delta P = \Delta P_{max} - \Delta P_{span} (h / H)$$

$$(I_x - 4) = (\Delta P_{max} - \Delta P) (16 / \Delta P_{span})$$

$$(I_x - 4) = \{ \Delta P_{max} - \Delta P_{span} (h / H) \} (16 / \Delta P_{span})$$



$$I_y = K (I_x - L)$$

$$K = \frac{\Delta P_{\text{spans}}}{\Delta P_{\text{span}}}$$

$$= \frac{\gamma_w s - \gamma_s s}{\gamma_w - \gamma_s}$$

lx : 드럼내의 압력이 0[kg/cm²]인 경우에 일정 수위 변화폭에 대한 출력 신호(여기서, 첨자 s의 표시는 드럼내의 압력이 0인 경우를 나타낸다.)

ly : 드럼내의 임의 압력에 대한 보정후의 출력신호

K : 보정계수

드럼 수위신호발신기의 설치 및 Calibration Range 계산식 “예”

드럼 수위신호발신기의 인출 배관시 상부 증기부에는 Condensate Pot를 부착하여 배관을 합니다. 증기의 경우는 증기온도가 200℃ 이상이 되기 때문에 반드시 증기를 응축시켜 액체상태로 만들어 측정하고자 할 때 사용됩니다. 그러므로 사전에 Pot와 계기사이에 응축액을 봉입하여 두기도 합니다. 단, 증기온도가 200℃ 이하일 경우는 발신기가 다이아프램형의 힘 평술식 차압계와 같이 접액부의 용접변화가 수 cc 정도라면 Tee와 Plug만으로도 충분합니다.

P1 : Drum pressure (28.0) [kg/cm²G.]

γw : Density of saturated water (0.8261) [g/cm³ AT P]

γs : Density of saturated steam (0.01423) [g/cm³ AT P]

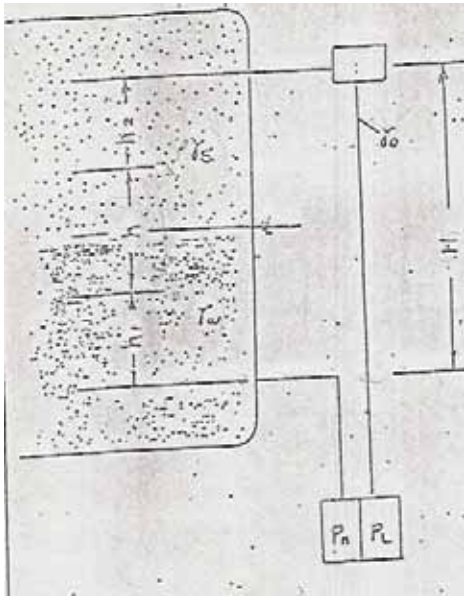
γo : Density of reference LEG (0.9893) [g/cm³ AT 50℃]

H : Length of reference LEG (500) [mm]

h : Measuring range (500) [mm]

h1 : Length between lower tap and 0% level (0) [mm]

h2 : Length between upper tap and 100% level (0) [mm]



Ph : High pressure of D/P cell

PL : Low pressure of D/P cell

The following equation will be consisted from the above conditions.

$$PL = P1 + (H \times \gamma_o) = P1 + (h1 + h + h2) \times \gamma_o$$

$$Phmin = P1 + (h1 \times \gamma_w) + (h + h2) \times \gamma_s$$

$$Phmax = P1 + (h1 + h) \times \gamma_w + (h2 \times \gamma_s)$$

Therefore

$$\Delta P0 = Phmin - PL$$

$$= h \times (\gamma_s - \gamma_o) + h1 \times (\gamma_w - \gamma_o) + h2 \times (\gamma_s - \gamma_o)$$

$$= h \times (\gamma_s - \gamma_o)$$

$$= 500 \times (0.01423 - 0.9893) = - 487.53 \text{ [mmH}_2\text{ O]}$$

$$\Delta P100 = Phmax - PL$$

$$= h \times (\gamma_w - \gamma_o) + h1 \times (\gamma_w - \gamma_o) + h2 \times (\gamma_s - \gamma_o)$$

$$= h \times (\gamma_w - \gamma_o)$$

$$= 500 \times (0.8261 - 0.9893) = - 81.6 \text{ [mmH}_2\text{ O]}$$

Then, the calibration of D/P cell shall be done as following.

$$\Delta P100 = \Delta P0 \sim \Delta P100$$

$$= - 487.53 \sim - 81.6 \text{ [mmH}_2\text{ O]}$$

급수량 조절밸브 사이즈 선정 계산식 “예”

조절밸브는 부하별로 밸브 전후단에 발생하는 차압을 계산한 후 CV값을 계산하여 사이즈를 선정하게 되며 일반적으로 사용되는 배관사이즈보다 한단계 정도 작으므로 배관하기 전 사이즈를 선정하여 레듀서 사용을 고려하여야 합니다. 또한, 제어장치의 최소운전부하율을 설정하여 밸브의 최소유량범위(min.)를 결정하여야 하며, Max. 유량범위가 밸브 CV표에서 70~80% 개도가 되도록 하며, Equal percentage 특성을 가진 Globe밸브가 일반적으로 사용하고 있습니다.

여기에 밸브 전후단 차압 계산표를 “예”를 들어 작성합니다.

| 항 목 | 기호 | 단위 | 계산식 | DESIGN MAX | MAX | NOR | MIN |
|----------------------|------|----------------------|--------------------------|---------------|-----|-------|-------|
| 1. 유 량 | | | | | | | |
| 1) 보일러증발량 | G | T/h | | 70.0 | | 70.0 | 10.5 |
| 2) 연속브로우량 | b | T/h | MCR의 2% | 0.7 | | 0.7 | 0.21 |
| 3) 밸브통과유량 | Q | T/h | G+b | 70.7 | | 70.7 | 10.71 |
| 2. 입구압력 | | | | | | | |
| 1) 보일러급수펌프 토출압력 | Pi | kg/cm ² G | | 58 | | 58 | 62 |
| 2) 급수의 비중 | γ | kg/m ³ | | 930 | | 930 | 930 |
| 3) 펌프에서 밸브까 지의 높이 | hi | m | | 4.5 | | 4.5 | 4.5 |
| | ΔPhi | kg/cm ² | (γxhi)/10000 | 0.42 | | 0.42 | 0.42 |
| 4) 배관저항 | ΔP1 | kg/cm ² G | | 0.36 | | 0.36 | 0.3 |
| 5) 급수유량계 저항 | ΔP2 | kg/cm ² G | | 0.12 | | 0.12 | 0.1 |
| 6) 기타 저항 | ΔP3 | kg/cm ² G | | - | | - | - |
| 7) 밸브입구 압력 | Pin | kg/cm ² G | Pi - ΔPhi - (ΔP1~ΔP3) | 57.1 | | 57.1 | 61.18 |
| 3. 출구압력 | | | | | | | |
| 1) 보일러드럼압력 | Po | kg/cm ² G | | 52.0 | | 47.0 | 47.0 |
| 2) 밸브에서 드럼까 지의 높이 | ho | m | | 2.5 | | 2.5 | 2.5 |
| | ΔPho | kg/cm ² G | (γxhi)/10000 | 0.23 | | 0.23 | 0.23 |
| 3) 급수예열기 저항 | ΔP4 | kg/cm ² G | | 1.2 | | 1.2 | 1.0 |
| 4) 배관저항 | ΔP5 | kg/cm ² G | | 0.24 | | 0.24 | 0.2 |
| 5) 기타 저항 | ΔP6 | kg/cm ² G | | - | | - | - |
| 6) 밸브출구 압력 | Pout | kg/cm ² G | Po+ΔPho+ (ΔP4~ΔP6) | 53.67 | | 48.67 | 48.43 |

보일러 급수설비의 기계장치

급수라인의 선정조건은 펌프 입구측 속도는 0.5~1m/sec, 출구측 속도는 1~3.5m/sec 로 합니다.

$$\text{라인사이즈 직경} = \sqrt{(4 \times G \times Sv) / (\pi \times V \times 3600)} \quad [M]$$

- G : Flow Capacity [kg/hr]
- Sv : Specific Volume [m³/kg]
- V : Velocity [m/sec]

일반적인 보일러의 급수라인 사이즈입니다. (단, 급수온도에 따라 달라질 수 있습니다.)

| 보일러형식 | 노통연관식보일러 | | | | 수관식보일러 | | | | | | | |
|--------------|----------|----|----|----|--------|----|----|----|----|----|----|-----|
| 보일러용량 [T/hr] | 3.5 | 5 | 8 | 10 | 15 | 20 | 25 | 30 | 35 | 40 | 45 | 50 |
| 라인사이즈 [A] | 40 | 50 | 50 | 50 | 65 | 65 | 65 | 80 | 80 | 80 | 80 | 100 |

보일러 급수펌프는 급수저장탱크에서 탈기된 급수를 보일러 드럼에 공급하며, 저부시 펌프의 과열상태를 방지하기 위하여 Minimum Flow Device를 포함하여 설치됩니다.

보일러 급수펌프 사양 결정 계산식

$$W_p = \frac{\{ (W_s + W_b) \times a \} + b}{N}$$

W_p : 보일러 급수펌프 용량 [kg/hr]
 W_s : 보일러 최대 연속 증발량 [kg/hr]
 W_b : 보일러 연속 BlowDown량 [kg/hr]
 a : 펌프 용량 Margin (10%)
 b : Minimum Flow [kg/hr]
 N : 보일러 급수펌프 정상 운전 댓수

보일러 급수펌프 토출 압력 결정 계산식

$$P_o = P_d + 1.10P + H + P_{cv} \text{ [kg/cm}^2\text{G.]}$$

P_d : 보일러 최대 연속부하시 드럼 압력 [kg/cm²G.]
 P : 보일러 급수펌프에서 드럼까지의 압력손실 [kg/cm²G.]
 H : 보일러 수두 [kg/cm²G.]
 P_{cv} : 급수 Control Valve의 압력 손실 [kg/cm²G.]

보일러 급수펌프 모터 용량 결정 계산식

$$S = 0.163 \times \frac{W_p \times (P_o - P_s) \times 10V}{60 \times \eta} \times M \text{ [Kw]}$$

- W_p : 보일러 급수펌프 용량 [kg/hr]
 P_s : 보일러 급수펌프 흡입 압력 [kg/cm²G.]
 (P_s = 탈기기 내부 압력 + 탈기기 수두 + 압력 손실)
 P_o : 보일러 급수펌프 토출 압력 [kg/cm²G.]
 V : 급수 비용적
 η : 보일러 급수펌프 효율
 M : Motor 용량 Margin (5%)