

**ES\_StableIF97.EXE 를 이용한 Reheat Steam Turbine Bypass System Sample 설계**

차 례

| <u>번호</u> | <u>항목</u>                        | <u>페이지</u> |
|-----------|----------------------------------|------------|
| 1.        | Sample 발전소                       | 2          |
| 1.1       | 개요                               | 2          |
| 1.2       | P&ID                             | 3          |
| 2.        | Bypass Valve 구매를 위한 설계           | 5          |
| 2.1       | Design Data                      | 5          |
| 2.2       | HP Bypass System Design Case 선정  | 7          |
| 2.3       | HRH Bypass System Design Case 선정 | 9          |
| 3.        | Control 용 Process Data 설계        | 13         |
| 3.1       | Bypass Valve의 Forced Opening     | 13         |
| 3.2       | Enthalpy Control을 위한 계산          | 23         |

Appendix : Reheat Steam Turbine Bypass System Description

## 1. Sample 발전소

설계 계산을 위한 Sample 발전소 개요는 다음과 같습니다.

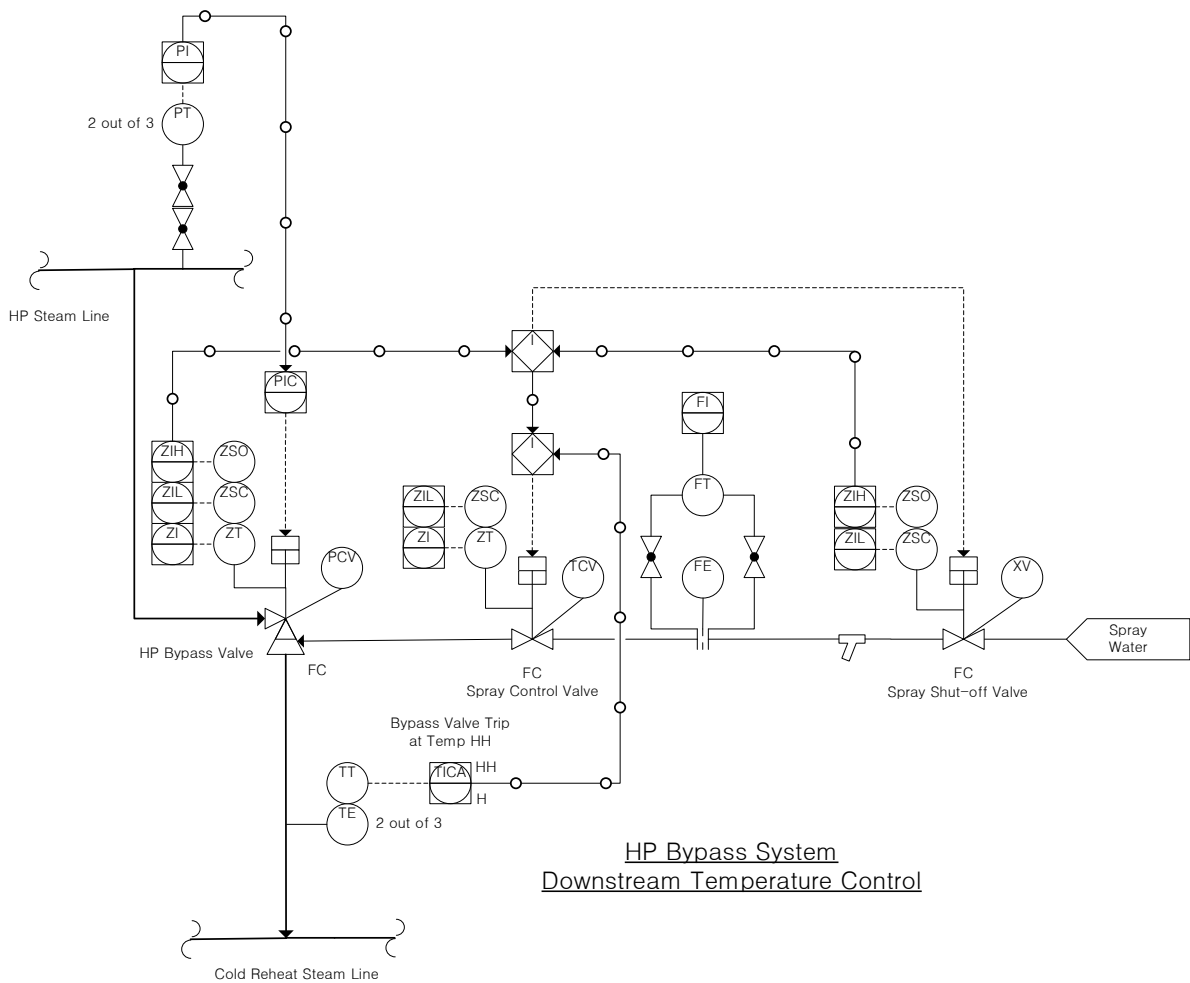
### 1.1 개요

| Item             | Description   |
|------------------|---|
| Configuration    | 2-2-1 Multi-shaft   |
| GTG              | F-Class 170 MW class ISO rating, LNG fired<br>50% load as minimum load for NOx emission limit   |
| HRSG             | Triple pressure, single reheat  |
| STG              | 200 MW class sub-critical, single reheat, sliding pressure operation<br>Rated pressure at MCR = 130 bara, minimum floor pressure = 50 bara  |
| HP Bypass Valve  | One 100% capacity for each HRSG, taking inlet from HP steam line and discharging to the cold reheat line of each HRSG<br>Upstream HP steam pressure control & downstream temperature control                |
| HRH Bypass Valve | One 100% capacity for each HRSG, taking inlet from hot reheat line and discharging to a common condenser through a dedicated dump tube<br>Upstream HRH steam pressure control & downstream enthalpy control |

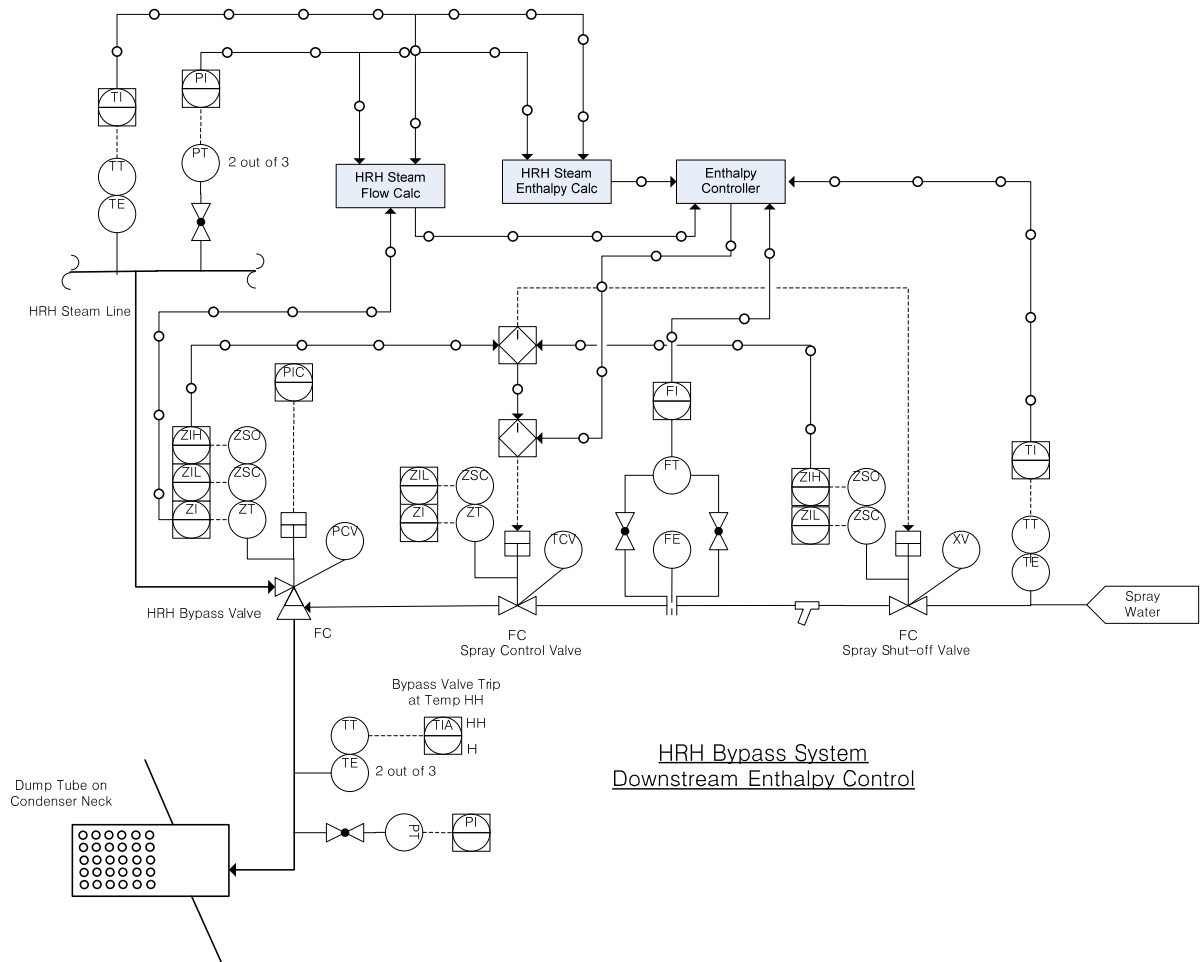
## 1.2 P&ID

본 Sample 발전소의 P&ID는 아래 그림과 같습니다.

### 1) HP Bypass System



2) HRH Bypass System



## 2. Bypass Valve 구매를 위한 설계

### 2.1 Design Data

Heat Balance Diagram에서 Bypass Valve Sizing에 영향을 줄 수 있는 모든 Cases의 Data를 추출합니다.

Bypass Valve 입구 압력과 온도가 동일한 경우에는 유량이 큰 Case가 Bypass Valve Sizing을 Governing하지만, 압력과 온도가 동일하지 않은 경우에는 유량이 큰 경우가 반드시 Governing하지는 않습니다.

Bypass Valve와 Dump Tube는 노즐(Nozzle)로 해석하면 설계 목적으로 사용하기에 충분한 정확도로 해석이 가능합니다. 노즐의 통과 유량은 입구 압력에 비례하고, 입구 온도의 제곱근에 반비례한다는 점을 염두에 두고 Cases를 선정해야 합니다.

변압 운전(Sliding Pressure Operation)을 하는 발전소의 경우에는 증기 압력이 낮은 저 부하 Case도 놓치지 않고 포함시켜야 합니다.

본 Sample 발전소의 경우 변압 운전을 하므로, 아래와 같이 검토할 Cases를 선정하였습니다. 동 발전소의 경우, Gas Turbine Exhaust Gas의 NOx Emission Limit를 맞추기 위해 Gas Turbine이 50% Load 이하로는 운전이 되지 않는 발전소입니다.

본 Sample 발전소의 HP Bypass Valve의 Temperature Control은 Outlet Temperature Control(Feed Back Control)을 적용하고, HRH Bypass Valve는 Enthalpy Control (Feed Forward Control)을 적용합니다.

HP Bypass Valve의 Outlet Set Temperature는 Outlet Steam Flow와 Spray Water Flow가 최대가 되도록 운전 온도 가운데 가장 낮은 온도로 설정하였습니다.

HRH Bypass Valve의 Outlet Set Enthalpy는 미국 HEI(Heat Exchange Institute)에서 발행한 "Standards for Steam Surface Condensers", Ninth Edition, December, 2002의 Addendum 1 에 따라 선정하였습니다.

동 HEI Standard에서, Condenser로 배출되는 Turbine Bypass Steam은 1225 Btu/lb (2849 kJ/kg)" 와 250 psia (17.2 bara)를 초과하지 않아야 하며, Dispersion Device(= Dump Tube) 내부 증기의 과열도는 "25 - 75 oF (13.9 - 41.7 oC)" 범위로, 습증기가 아니어야 한다고 규정하고 있습니다.

동 HEI Standard에서 규정한 최대 Enthalpy 2849 kJ/kg으로 HRH Bypass Valve의 Set Enthalpy를 선정하면, Outlet Steam Flow 및 Spray Water Flow가 최소가 되므로, 그 보다 낮은 Enthalpy로 Set 값을 선정하여 선정된 Design Flow가 적절한 Margin을 갖도록 하였습니다.

위에서 언급한 HEI Standard의 Addendum의 Original Edition인 Ninth Edition의 Clause 5.4.2 에는 High Flow Steam Dump의 경우 1190 Btu/lb (2768 kJ/kg)을 초과하지 않아야 한다는 규정이 있습니다. Original Edition에서 규정한 Enthalpy가 Addendum에서 규정한 Enthalpy 보다 낮아서 Design Flow에 적절한 Margin을 확보할 수 있으므로, HRH Bypass Valve의 Set Enthalpy는 2768 kJ/kg으로 선정하였습니다.

1) HP Bypass Valve Design Data

| Operating mode     | Unit  | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|--------------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.       | bara  | 130               | 100              | 75                | 55               |
| Inlet temp.        | oC    | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow         | kg/hr | 185,000           | 140,000          | 195,000           | 145,000          |
| Outlet(CRH) press. | bara  | 26                | 21               | 16                | 13               |
| Outlet temp.       | oC    | 340               | 340              | 340               | 340              |
| Spray press.       | bara  | 50                | 50               | 50                | 50               |
| Spray temp.        | oC    | 160               | 150              | 150               | 140              |
|                    |       |                   |                  |                   |                  |

◇ Spray water source : BFP intermediate stage

2) HRH Bypass Valve Design Data

| Operating mode   | Unit  | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|------------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.     | bara  | 24                | 19               | 14                | 11               |
| Inlet temp.      | oC    | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow       | kg/hr | 215,000           | 170,000          | 225,000           | 170,000          |
| Condenser press. | bara  | 0.05              | 0.05             | 0.05              | 0.05             |
| Outlet enthalpy  | kJ/kg | 2768              | 2768             | 2768              | 2768             |
| Spray press.     | bara  | 25                | 25               | 25                | 25               |
| Spray temp.      | oC    | 30                | 30               | 30                | 30               |
|                  |       |                   |                  |                   |                  |

◇ Spray water source : CEP discharge

## 2.2 HP Bypass System Design Case 선정

### 2.2.1 HP Bypass Valve Design Case 선정

Bypass Valve의 Design Case는 Bypass Valve의 Flow Capacity (Kv) 계산을 수행해서, 가장 큰 Kv 값을 갖는 경우를 Design Case로 선정합니다.

HP Bypass Valve 구매 사양서(Procurement Specification)을 작성하기 전에, 가능한 모든 Cases에 대해 Bypass Valve의 Kv 값을 미리 계산해 봄으로써, 더 큰 Size의 Bypass Valve가 요구되는 Case가 누락되지 않도록 해야 합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Steam C/V (Design, Opening/Kv/Cv calc" 로 계산한 결과입니다.

ES\_StableIF97.EXE 실행 후, 메뉴의 [Option] > [Clip board copy, item by item] > [Value only] 기능을 이용하면, 계산된 값을 직접 입력할 필요 없이, 프로그램 화면의 해당 칸을 클릭하여 Clip Board에 복사(Copy)한 후 붙이기(Paste)를 하면 편리합니다.

계산 결과, 유량이 가장 큰 2GT Base Load Case 보다 유량이 작지만 압력이 가장 낮은 1GT 50% Load Case가 가장 큰 Kv 값을 가지는 것으로 나타나서, HP Bypass Valve의 경우에는 1GT 50% Load Case가 Design Case로 선정되었습니다.

| Operating mode          | Unit      | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|-------------------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.            | bara      | 130               | 100              | 75                | 55               |
| Inlet temp.             | oC        | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow              | kg/hr     | 185,000           | 140,000          | 195,000           | 145,000          |
| Outlet(CRH) press.      | bara      | 26                | 21               | 16                | 13               |
| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |           |                   |                  |                   |                  |
| Kv                      | m3/hr/bar | 180.1             | 178.9            | 334.8             | <b>341.6</b>     |
| Valve nozzle press      | Bara      | 71.4              | 54.9             | 41.2              | 30.2             |
| Choked?                 | Yes/No    | Yes               | Yes              | Yes               | Yes              |
| Design case             |           |                   |                  |                   | ✓                |

주 : Valve nozzle press => Outlet press 이면 Choked.

### 2.2.2 Outlet Steam 및 Spray Water System Design Flow 선정

Outlet Steam 및 Spray Water System의 Design Flow는 Bypass System의 Heat Balance 계산으로 선정합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Desuperheating H/B (Inlet Flow given)" 로 계산한 결과입니다.

계산 결과, 1GT Base Load Case가 Spray Water Flow 및 Outlet Steam Flow의 Design Flow Case로 선정되었습니다.

| Operating mode          | Unit  | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|-------------------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.            | bara  | 130               | 100              | 75                | 55               |
| Inlet temp.             | oC    | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow              | kg/hr | 185,000           | 140,000          | 195,000           | 145,000          |
| Outlet(CRH) press.      | bara  | 26                | 21               | 16                | 13               |
| Outlet temp.            | oC    | 340               | 340              | 340               | 340              |
| Spray press.            | bara  | 50                | 50               | 50                | 50               |
| Spray temp.             | oC    | 160               | 150              | 150               | 140              |
| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |       |                   |                  |                   |                  |
| Spray flow              | kg/hr | 31,603            | 24,364           | <b>34,741</b>     | 26,000           |
| Outlet flow             | kg/hr | 216,603           | 164,364          | <b>229,741</b>    | 171,000          |
| Design case             |       |                   |                  | ✓                 |                  |



### 2.3 HRH Bypass System Design Case 선정

HRH Bypass Valve 후단에 Dump Tube가 설치되므로, HRH Bypass System은 HRH Bypass Valve와 Dump Tube를 같이 설계해야 합니다.

우선 HRH Bypass System의 Heat Balance 계산을 수행하여, Design Flow를 먼저 선정합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Desuperheating H/B (Inlet Flow given)" 로 계산한 결과입니다.

계산 결과, HP Bypass Valve와 동일하게, 1GT Base Load Case가 Spray Water Flow 및 Outlet Steam Flow의 Design Flow Case로 선정되었습니다.

#### 2.3.1 Outlet Steam 및 Spray Water System Design Flow 선정

| Operating mode          | Unit  | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|-------------------------|-------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.            | bara  | 24                | 19               | 14                | 11               |
| Inlet temp.             | oC    | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow              | kg/hr | 215,000           | 170,000          | 225,000           | 170,000          |
| Condenser press.        | bara  | 0.05              | 0.05             | 0.05              | 0.05             |
| Outlet enthalpy         | kJ/kg | 2768              | 2768             | 2768              | 2768             |
| Spray press.            | bara  | 25                | 25               | 25                | 25               |
| Spray temp.             | oC    | 30                | 30               | 30                | 30               |
| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |       |                   |                  |                   |                  |
| Spray flow              | kg/hr | 68,839            | 54,712           | <b>72,785</b>     | 55,161           |
| Outlet flow             | kg/hr | 283,839           | 224,712          | <b>297,785</b>    | 225,161          |
| Design case             |       |                   |                  | ✓                 |                  |

#### 2.3.2 Dump Tube Design

Dump Tube의 Design Inlet Flow는 HRH Bypass Valve의 Design Outlet Flow로서, 앞에서 선정된 297,785 kg/hr 이며, Design Inlet Enthalpy는 2768 kJ/kg 입니다.

Dump Tube 설계를 위해서 한가지 더 필요한 조건은 Design Inlet Pressure 입니다.

HEI Standard에서는 Condenser로 배출되는 증기의 압력이 250 psia (17.2 bara)를 초과하지 않아야 한다고 규정하고 있습니다.

하지만 동 압력이 Dump Tube 입구 압력에 대해 규정한 것인지, Dump Tube 출구 압력에 대해 규정한 것인지 명확하게 기술하고 있지 않습니다. 그런데, HEI Standard 내용을 보면 Dispersion Device를 Condenser의 일부로 규정하고 있고, 동 Dispersion Device가 Dump Tube인 점을 고려하면, 규정된 250 psia (17.2 bara)는 Dump Tube Inlet 압력이라고 해석하는 것이 올바른 해석이라고 볼 수 있습니다.

그러므로, Dump Tube Inlet 압력은 17.2 bara 가 초과되지 않도록 선정해야 합니다.

아울러, Dump Tube의 Design Inlet Pressure는 경제적인 측면에서 아래 사항을 고려하여 선정해야 합니다.

- Dump Tube Inlet Pressure가 높으면 높을수록, Dump Tube Nozzle(Opening Hole) Area가 줄어들어, Dump Tube 제작 비용이 줄어듭니다.
- Dump Tube Inlet Pressure가 높다는 것은, HRH Bypass Valve 출구 압력이 높다는 것을 의미합니다. HRH Bypass Valve 출구 압력이 높아서, HRH Bypass Valve의 설계 조건이 Sub-critical(Non Choked) 상태가 되면, HRH Bypass Valve의 Flow Capacity(Kv)가 증가하며, HRH Bypass Valve의 제작 비용이 증가합니다.
- 위와 같은 이유로, Dump Tube Inlet Pressure는, HRH Bypass Valve가 Sub-critical(Non Choked) 상태가 되지 않는 조건 하에서, 가능하면 높게 선정하는 것이 바람직합니다.
- 물론, 필요에 따라서는 HRH Bypass Valve가 Sub-critical(Non Choked) 상태가 되는 조건으로 설계 조건을 선정한다고 해도 문제가 되지는 않습니다.

Dump Tube의 Design Case로 선정된 "1 GT Base Load" Case의 HRH Bypass Valve Inlet Pressure가 14 bara 인 점과, Steam Nozzle의 임계 압력 비(Critical Pressure Ratio = 출구 절대 압력 / 입구 절대 압력)가 약 0.54 인 점을 고려할 때, Dump Tube Design Inlet Pressure를  $14 \text{ bara} \times 0.54 = 7.56 \text{ bara}$  보다 낮게 선정하면, HRH Bypass Valve가 Choked 상태가 되므로, 적정한 것으로 판단됩니다.

HRH Bypass Valve Outlet과 Dump Tube Inlet 사이의 배관에서의 압력 강하를 고려하여, Dump Tube Design Inlet Pressure로 7 bara로 선정합니다.

Dump Tube의 Inlet Design Flow는 1GT Base Load Case의 Outlet Flow 297,785 kg/hr이므로, 동 유량과 설계 입구 압력으로 선정된 7 bara 압력에서 Dump Tube의 Opening Area를 아래와 같이 설

계합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Dump Tube (Design, Nozzle Area calc)" 로 계산한 결과입니다.

Dump Tube의 설계 Opening Area(= Nozzle Area)는 811.7 cm<sup>2</sup>으로 선정되었습니다.

|                         |                 |                |
|-------------------------|-----------------|----------------|
| Operating mode          | Unit            | 1 GT Base Load |
| Inlet press.            | Bara            | 7              |
| Inlet enthalpy          | kJ/kg           | 2768           |
| Inlet flow              | kg/hr           | 297,785        |
| Condenser press.        | bara            | 0.05           |
| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |                 |                |
| Inlet temp              | oC              | 167.0          |
| Nozzle area             | cm <sup>2</sup> | <b>811.7</b>   |
| Nozzle press            | bara            | 4.04           |
| Nozzle temp             | oC              | 143.9          |
| Nozzle velocity         | m/s             | 451.4          |
| Choked?                 | Yes/No          | Yes            |

### 2.3.3 Dump Tube Off-Design

앞 절에서 선정한 Dump Tube의 Nozzle(Opening Hole) Area 811.7 cm<sup>2</sup> 을 적용하여, 다른 3가지 Cases에서의 Dump Tube Inlet Pressure를 계산하여, 각 Case 별 HRH Bypass Valve Outlet Pressure 를 선정합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Dump Tube (Off-Design, P by Flow & H)" 로 계산한 결과입니다.

| Operating mode   | Unit            | 2 GT Base Load | 2 GT 50% Load | 1 GT 50% Load |
|------------------|-----------------|----------------|---------------|---------------|
| Nozzle area      | cm <sup>2</sup> | 811.7          | 811.7         | 811.7         |
| Inlet flow       | kg/hr           | 283,839        | 224,712       | 225,161       |
| Inlet enthalpy   | kJ/kg           | 2768           | 2768          | 2768          |
| Condenser press. | bara            | 0.05           | 0.05          | 0.05          |

| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |        |             |             |             |
|-------------------------|--------|-------------|-------------|-------------|
| Inlet press             | bara   | <b>6.67</b> | <b>5.25</b> | <b>5.26</b> |
| Inlet temp              | oC     | 165.9       | 161.1       | 161.2       |
| Nozzle press            | bara   | 3.84        | 3.03        | 3.04        |
| Nozzle temp             | oC     | 142.2       | 133.9       | 133.9       |
| Nozzle velocity         | m/s    | 451.1       | 449.2       | 449.2       |
| Choked?                 | Yes/No | Yes         | Yes         | Yes         |

### 2.3.4 HRH Bypass Valve Design Case 선정

Bypass Valve의 Design Case는 Bypass Valve의 Flow Capacity (Kv) 계산을 수행해서, 가장 큰 Kv 값을 갖는 경우를 Design Case로 선정합니다.

HRH Bypass Valve 구매 사양서(Procurement Specification)을 작성하기 전에, 가능한 모든 Cases에 대해 Bypass Valve의 Kv 값을 미리 계산해 봄으로써, 더 큰 Size의 Bypass Valve가 요구되는 Case가 누락되지 않도록 해야 합니다.

아래 계산은, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Steam C/V (Design, Opening/Kv/Cv calc" 로 계산한 결과입니다.

계산 결과, HP Bypass Valve와 달리 1GT 50% Load Case 보다는 1GT Base Load Case가 Kv 값이 가장 큰 것으로 나타나서, HRH Bypass Valve의 경우에는 1GT Base Load Case가 Design Case로 선정되었습니다.

| Operating mode          | Unit      | 2 GT<br>Base Load | 2 GT<br>50% Load | 1 GT<br>Base Load | 1 GT<br>50% Load |
|-------------------------|-----------|-------------------|------------------|-------------------|------------------|
| Inlet press.            | Bara      | 24                | 19               | 14                | 11               |
| Inlet temp.             | oC        | 567               | 567              | 567               | 567              |
| Inlet flow              | kg/hr     | 215,000           | 170,000          | 225,000           | 170,000          |
| Outlet press.           | bara      | 6.67              | 5.25             | 7                 | 5.26             |
| ES_StableIF97.EXE 계산 결과 |           |                   |                  |                   |                  |
| Kv                      | m3/hr/bar | 1171.2            | 1171.4           | <b>2107.0</b>     | 2027.8           |
| Valve nozzle press      | Bara      | 13.2              | 10.4             | 7.69              | 6.04             |
| Choked?                 | Yes/No    | Yes               | Yes              | Yes               | Yes              |
| Design case             |           |                   |                  |                   | ✓                |

주 : Valve nozzle press => Outlet press 이면 Choked.

### 3. Control 용 Process Data 설계

Bypass Valve의 Pressure Control과 Feed Back Temperature Control은 별도의 Process Data 설계가 불필요 하지만, Steam Turbine Trip 시의 Forced Opening 및 Feed Forward Temperature Control을 위해서는 Control에서 사용할 Process Data Design이 필요합니다.

#### 3.1 Bypass Valve의 Forced Opening

Steam Turbine Trip 시 Bypass Valve를 Upstream Pressure Controller를 사용하여 열면 그 반응 속도가 느려서, Steam Header Pressure를 Safety Valve Pop-up 압력 이하로 유지하는 것이 어렵습니다.

이에 대한 보완책으로, Steam Turbine Trip 시 Steam Turbine Trip Signal을 Hardwire Signal로 받아서, Steam Turbine Trip 바로 이전의 유량을 흘릴 수 있는 Opening으로 Bypass Valve를 최대한 빨리 강제로 열어서, 즉 Forced Open하여, Steam Turbine으로 흐르던 유량을 Bypass Valve로 전환하여 압력이 상승하는 것을 억제합니다.

이러한 Forced Opening을 구현하기 위해서는, Steam Turbine 운전 중에 Steam Turbine으로 흐르는 유량을 측정하여, 동 유량에 해당하는 Bypass Valve의 Opening을 미리 계산하는 Logic을 Plant DCS(Distribution Control System)에 구성해 놓아야 합니다.

Bypass Valve의 Opening을 계산하기 위해서는, Bypass Valve 입구 유량과 입구 압력 및 온도, 그리고 Bypass Valve 출구 압력을 알아야 합니다.

Bypass Valve 입구 유량은, Steam Line에 설치된 Flow Meter로부터 읽거나 혹은 Steam Turbine First Stage Shell Pressure로부터 계산합니다.

Steam Flow Meter의 Accuracy가 10 ~ 15% 정도로 정확하지 않은 점을 고려할 때, Steam Turbine First Stage Shell Pressure로부터 계산한 유량을 사용하는 것이 더 유리할 수 있습니다.

Steam Turbine First Stage Shell Pressure로부터 유량을 계산하는 원리는, Steam Turbine을 하나의 노즐(Nozzle)로 보고 계산하는 것으로 그리 어려운 계산은 아니지만, Steam Turbine 제작자와 협의하여 계산 Logic을 작성하는 것이 바람직합니다.

Bypass Valve 입구 압력과 온도, 그리고 출구 압력은 해당 계기들로부터 읽어 드립니다.

Bypass Valve의 Forced Opening을 계산할 때, 이상기체의 노즐 공식을 사용하는 방법도 있지만, 증기가 이상기체와는 달리 유동을 할 뿐만 아니라, Plant DCS(Distributed Control System)에서는 복잡한 수식을 구현하는 것에 어려움이 있으므로, Plant DCS에서 일반적으로 사용하는 테이블

(Table)을 이용한 공식을 작성해 보도록 하겠습니다.

### 3.1.1 입구 유량을 가지고 설계 조건에서의 Valve Stroke % 계산

앞서 계산된, HP Bypass Valve의 계산된 설계 Flow Capacity, Kv 값이 341.6 m<sup>3</sup>/hr/bar로, 이는 "1 GT 50% Load" Case로 입구 조건이 55 bar,a, 567 oC인 Choked 상태에서 145,000 kg/hr의 유량이 흐를 때의 값입니다.

계산된 설계 Flow Capacity, Kv 값이 341.6 m<sup>3</sup>/hr/bar 이므로, 제작자가 공급하는 HP Bypass Valve의 최대 Kv 값은 계산된 Kv 값의 최소 110% 이상, 즉 341.6 x 1.1 = 375.8 m<sup>3</sup>/hr/bar 이상이 되어야 합니다.

Valve Stroke(%)와 Valve Port Opening Area는 Valve Characteristic에 따라 일정한 관계를 가지고 비례하며, Valve Port Opening Area와 Valve의 Kv 값은 선형 비례합니다.

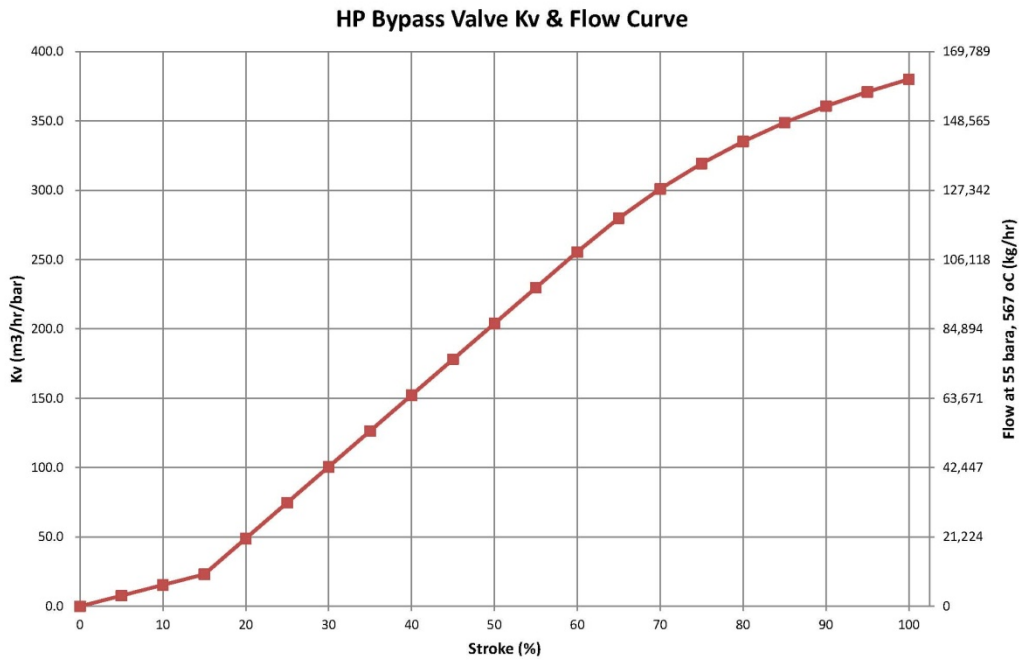
Steam Control Valve의 Valve Port Opening Area와 Kv 값은 아래와 같은 관계 식으로 선형 비례합니다.

$$Kv = 0.05043 \times A$$

주 : Kv = Valve Flow Capacity, m<sup>3</sup>/hr/bar  
A = Valve Port Opening Area, mm<sup>2</sup>

Valve 압력, 온도 조건이 동일하다면 Valve 유량은 Valve Opening Area에 선형 비례하므로, Valve 압력, 온도 조건이 동일하다면 Valve Stroke(%)와 Valve Kv 및 Valve 유량은 Valve Characteristic에 따라 일정한 관계를 가지고 비례합니다.

제작자가 공급하는 HP Bypass Valve의 Kv 최대 값, 즉 100% Stroke에서의 값이 380 m<sup>3</sup>/hr/bar 이라고 가정하고, Valve Characteristic이 Modified Linear 인 경우 Valve Stroke %에 대한 Kv 및 Flow Curve Sample은 아래 그림과 같습니다.



이를 테이블로 표시하면 아래와 같습니다.

Table 1, HP Bypass Valve Stroke vs. Flow

| Stroke (%) | Kv (m3/hrbar) | Flow at 55 bara, 567 oC (kg/hr) |
|------------|---------------|---------------------------------|
| 0          | 0.0           | 0                               |
| 5          | 7.7           | 3,269                           |
| 10         | 15.4          | 6,539                           |
| 15         | 23.1          | 9,808                           |
| 20         | 48.9          | 20,770                          |
| 25         | 74.8          | 31,731                          |
| 30         | 100.6         | 42,693                          |
| 35         | 126.4         | 53,655                          |
| 40         | 152.2         | 64,617                          |
| 45         | 178.1         | 75,579                          |
| 50         | 203.9         | 86,540                          |

|     |       |         |
|-----|-------|---------|
| 55  | 229.7 | 97,502  |
| 60  | 255.5 | 108,464 |
| 65  | 279.9 | 118,806 |
| 70  | 301.0 | 127,775 |
| 75  | 319.3 | 135,529 |
| 80  | 335.1 | 142,233 |
| 85  | 348.8 | 148,037 |
| 90  | 360.6 | 153,076 |
| 95  | 371.0 | 157,465 |
| 100 | 380   | 161,300 |

위의 테이블에서, 설계 유량인 145,000 kg/hr 유량에서의 Kv 값과 Stroke(%) 값을 보간 법으로 구해 보면 아래와 같습니다.

$Kv \text{ at } 145,000 \text{ kg/hr} = (145,000 - 142,233) / (148,037 - 142,233) \times (348.8 - 335.1) + 335.1 = 341.6$   
(m<sup>3</sup>/hr/bar)로 작성 기준과 동일한 값이 산출됩니다.

$Stroke \text{ at } 145,000 \text{ kg/hr} = (145,000 - 142,233) / (148,037 - 142,233) \times (85 - 80) + 80 = 82.38$  (%)  
값이 산출됩니다.

Table 1에서, Kv에 따른 유량 값은 ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"으로 계산이 되지만, Stroke(%)에 따른 Kv 혹은 유량 값은 Valve Characteristic에 따라 달라지므로, Bypass Valve 제작자로부터 접수해야 합니다.

### 3.1.2 Flow Correction Factor Table 작성하기

위의 Table 1은 입구 조건 55 bara, 567 oC 기준의 Choked 상태의 테이블이므로, 다른 입구 조건 및 Choked 상태가 아닌 경우의 보정 계수(Correction Factor) 테이블이 필요합니다.

ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"로, 다른 조건은 모두 동일하고 입구 압력만 달라지는 경우의 유량을 계산해서, 유량 보정 계수를 테이블로 만들면 아래와 같습니다.



Table 2, Flow - Inlet Pressure Correction Factor

| Inlet press,<br>bara | Flow, kg/hr | Corr. Factor<br>(MCFp) |
|----------------------|-------------|------------------------|
| 40                   | 104,999     | 0.7241                 |
| 50                   | 131,634     | 0.9078                 |
| 55                   | 145,000     | 1.0000                 |
| 60                   | 158,430     | 1.0926                 |
| 70                   | 185,394     | 1.2786                 |
| 80                   | 212,528     | 1.4657                 |
| 90                   | 239,838     | 1.6541                 |
| 100                  | 267,330     | 1.8437                 |
| 110                  | 295,007     | 2.0345                 |
| 120                  | 322,876     | 2.2267                 |
| 130                  | 350,943     | 2.4203                 |
| 140                  | 379,211     | 2.6153                 |
| 150                  | 407,688     | 2.8116                 |

동일한 방법으로 입구 온도에 따른 유량 보정 계수 테이블을 작성하면 아래와 같습니다.

Table 3, Flow - Inlet Temperature Correction Factor

| Inlet temp,<br>oC | Flow, kg/hr | Corr. Factor<br>(MCFt) |
|-------------------|-------------|------------------------|
| 400               | 166,528     | 1.1485                 |
| 425               | 162,530     | 1.1209                 |
| 450               | 158,880     | 1.0957                 |
| 475               | 155,519     | 1.0725                 |
| 500               | 152,402     | 1.0510                 |
| 525               | 149,495     | 1.0310                 |
| 550               | 146,771     | 1.0122                 |
| 567               | 145,000     | 1.0000                 |
| 575               | 144,208     | 0.9945                 |
| 600               | 141,789     | 0.9779                 |
| 625               | 139,500     | 0.9621                 |

위의 두 테이블은 Valve 가 Choked 상태인 경우의 보정 계수들입니다. Bypass Valve 가 Choked 상태가 아닌 조건에서 운전될 경우가 많지는 않지만, 만약의 경우를 고려하여, Choked 상태가 아닌 경우에 대한 보정 계수를 작성할 필요가 있습니다.

Choked 상태가 아닌 경우의 보정 계수는, Valve 출구 절대 압력을 입구 절대 압력으로 나눈, 압력비에 대한 보정 계수로 표시합니다.

Table 4, Flow - Pressure Ratio Correction Factor

| Inlet press, bara | Outlet press, bara | Press ratio | Flow, kg/hr | Corr. Factor (MCFpr) |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------|----------------------|
| 55                | < 30.192           | < 0.5489    | 145,000     | 1.0000               |
| 55                | 30.192             | 0.5489      | 145,000     | 1.0000               |
| 55                | 32.5               | 0.5909      | 144,425     | 0.9960               |
| 55                | 35                 | 0.6364      | 142,414     | 0.9822               |
| 55                | 37.5               | 0.6818      | 138,877     | 0.9578               |
| 55                | 40                 | 0.7273      | 133,662     | 0.9218               |
| 55                | 42.5               | 0.7727      | 126,530     | 0.8726               |
| 55                | 45                 | 0.8182      | 117,103     | 0.8076               |
| 55                | 47.5               | 0.8636      | 104,733     | 0.7223               |
| 55                | 50                 | 0.9091      | 88,159      | 0.6080               |

Pressure Ratio 가 Critical Pressure Ratio 인 0.5489 이하인 경우에는, Choked 상태이므로 Choked 상태와 동일한 유량이 흐릅니다.

Correction Factor 작성 방법

위에서 작성된 Correction Factors 들은, Valve 가 일정한 Flow Capacity, Kv 값을 유지할 때, 즉 일정한 Opening 을 유지할 때, 설계 조건과 다른 조건에서 흐르는 유량의 설계 유량에 대한 비율입니다.

ES\_StableIF97.EXE 를 사용하여 위의 Correction Factor 들을 계산을 할 때, 임의의 Kv 값을 사용해도 되지만, 테이블에 표시된 유량들은 설계 값인 Kv = 341.6 m<sup>3</sup>/hr/bar 를 사용해 작성한 값들입니다.

예를 들어, Table 2 에서 130 bara Inlet Press 에서의 유량 350,943 kg/hr 는, ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"에서 아래 프로그램 화면 그림과 같이 Inlet Press 값에 130 bara, Valve Kv 값에 341.6 m<sup>3</sup>/hr/bar 을 입력하고 실행해서 구한 값입니다.

그리고, Correction Factor 2.4203 은, 350,943 kg/hr 를, 설계 유량인 145,000 kg/hr 로 나누어 구한 값입니다.

Calculation: Steam CV (Off-Design, Kv given)

Title: Title1

| Item                  | Unit       | Value               |
|-----------------------|------------|---------------------|
| Inlet Press           | bar a      | 130                 |
| Inlet Temp            | oC         | 567                 |
| Inlet Dryness         |            | Steam(Sub-critical) |
| Inlet Enthalpy        | kJ/kg      | 3515.7168504441     |
| Inlet Flow            | kg/hr      | 350942.562491765    |
| Valve Back Press      | bar a      | 13                  |
| Valve Nozzle Press    | bar a      | 71.3855066580244    |
| Valve Nozzle Temp     | oC         | 461.095684931759    |
| Valve Nozzle Dryness  |            | Steam(Sub-critical) |
| Valve Nozzle Enthalpy | kJ/kg      | 3313.90823282215    |
| Valve Nozzle Velocity | m/s        | 635.308771577964    |
| Valve Opening Area    | cm2        | 67.7374578623835    |
| Valve Kv              | m3/hr/bar  | 341.6               |
| Valve Cv              | US gpm/psi | 394.8896            |

Valve inlet: Pressure, Temperature

Clipboard copy

Values only

incl. Notes

List: [Empty]

Add to list, Update list, Delete list

Valve Nozzle Choking Press : 71.3855066580244  
 Valve Inlet Sat. Temp. : 330.856854433038  
 Valve Nozzle Sat. Temp. : 287.159355073189

### 3.1.3 계산 공식

앞서의 테이블들에 기술된 Correction Factors 들은, Stroke(%)가 일정할 때의 유량 Correction Factors 들이므로, 유량을 가지고 Stroke(%)을 구하고자 하는 Forced Opening 계산에서는 이들 Correction Factors 들로 나누어 주어야 합니다.

즉, 실제 조건에서 측정된 유량을 Table 1 에서 사용하기 위한 설계 조건의 유량으로 보정하기 위한 식은 아래와 같습니다.

$$Q_d = Q_a / MCF_p / MCF_t / MCF_{pr}$$

주 :  $Q_d$  = Flow Corrected for Design Condition, kg/hr  
 $Q_a$  = Flow Measured at Actual Condition, kg/hr  
 $MCF_p$  = Inlet Pressure Correction Factor (Table 2)  
 $MCF_t$  = Inlet Temperature Correction Factor (Table 3)  
 $MCF_{pr}$  = Pressure Ratio Correction Factor (Table 4)

Kv at  $Q_d$  : Table 1 에서 보간 법으로 계산

Stroke(%) at  $Q_d$  : Table 1 에서 보간 법으로 계산

### 3.1.4 예제 계산

본 예제 계산에서는, 앞서의 테이블들을 이용한 계산의 최대 오차를 가늠해 볼 목적으로 아래와 같이 극단적인 조건들에 대해 계산해 보도록 하겠습니다.

< 측정 값 >

Inlet Pressure = 150 bara

Inlet Temperature = 400 oC

Inlet Flow( $Q_a$ ) = 300,000 kg/hr

Outlet Pressure = 136.36 bara

Pressure Ratio =  $136.36 / 150 = 0.9091$

< 계산 >

$MCF_p = 2.8116$  (Table 2)

$MCF_t = 1.1485$  (Table 3)

$MCF_{pr} = 0.6080$  (Table 4)

$$Q_d = Q_a / MCF_p / MCF_t / MCF_{pr} = 300,000 / 2.8116 / 1.1485 / 0.6080 = 152,806 \text{ kg/hr}$$

(Table 1)

Kv at 152,806 kg/hr =  $(152,806 - 148,037) / (153,076 - 148,037) \times (360.6 - 348.8) + 348.8 = 360.0$   
(m<sup>3</sup>/hr/bar)

Stroke at 152,806 kg/hr =  $(152,806 - 148,037) / (153,076 - 148,037) \times (90 - 85) + 85 = 89.7$  (%)

< 오차 계산 >

앞서의 측정 값들을 가지고, ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Steam C/V (Design, Opening/Kv/Cv calc" 기능으로 실제 Kv 값을 계산해 보면, 아래 프로그램 화면 그림과 같이 336.9 m3/hr/bar로 계산됩니다.

즉, 이 경우 테이블 계산에 의한 오차는  $1 - 336.9 / 360.0 = 6.4(\%)$  입니다.

The screenshot shows the 'ES\_StableIF97 / New File (User : ENGSoft)' window. The 'Calculation' dropdown is set to 'Steam C/V (Design, Opening/Kv/Cv calc.)'. The 'Title' is 'Title1'. A table displays the following data:

| Item                  | Unit       | Value               |
|-----------------------|------------|---------------------|
| Inlet Press           | bar a      | 150                 |
| Inlet Temp            | oC         | 400                 |
| Inlet Dryness         |            | Steam(Sub-critical) |
| Inlet Enthalpy        | kJ/kg      | 2975.54767580348    |
| Inlet Flow            | kg/hr      | 300000              |
| Valve Back Press      | bar a      | 136.36              |
| Valve Nozzle Press    | bar a      | 136.36              |
| Valve Nozzle Temp     | oC         | 385.44471035329     |
| Valve Nozzle Dryness  |            | Steam(Sub-critical) |
| Valve Nozzle Enthalpy | kJ/kg      | 2953.3694076184     |
| Valve Nozzle Velocity | m/s        | 210.609915175359    |
| Valve Opening Area    | cm2        | 66.8031868108244    |
| Valve Kv              | m3/hr/bar  | 336.888471086987    |
| Valve Cv              | US gpm/psi | 389.443072576557    |

Below the table, there are additional calculated values:

- Valve Nozzle Choking Press : 82.8613367361494
- Valve Inlet Sat. Temp. : 342.157871248984
- Valve Nozzle Sat. Temp. : 334.593139533996

작지 않은 오차이지만, 극단적인 경우이고 Forced Opening 값으로 사용하기에는, 큰 무리는 없습니다. 위의 경우 테이블 계산 값이 실제 값보다 6.4% 크게 계산되었으므로, Steam Turbine Trip

시 Trip 이전의 압력보다 Trip 후 압력이 낮게 유지될 것이므로, 오히려 더 바람직한 결과입니다.

이렇게 큰 오차가 난 이유는, 기준 압력이 55 bara 인 반면 예제 계산의 압력이 150 bara로 그 차이가 커서 발생한 오차입니다.

오차를 줄이려면, 130 bara, 567 oC 기준 압력 및 온도에 대해, Stroke(%) vs. Flow Table을 포함해 모든 Correction Tables 들을 추가로 작성해서, 100 bara 이하 및 이상을 구분하여 계산을 하면 오차를 줄일 수 있습니다.

### 3.2 Enthalpy Control을 위한 계산

Enthalpy Control은 Bypass Valve 전후의 Heat Balance 계산을 해서, Spray Water 유량을 계산한 다음, 계산된 Spray Water Flow가 분사되도록 Spray Water Flow를 제어하는 것입니다. 즉, Spray Water Control Valve가 Bypass Valve 후단의 온도를 제어하는 것이 아니고, 실제로는 Spray Water Flow를 제어하는 것입니다.

Bypass Valve 전후의 Heat Balance 를 계산하기 위해서는, Bypass Valve 입구 유량을 알아야 하며, Bypass Valve 입, 출구의 증기 및 Spray Water Enthalpy 값을 알아야 합니다.

#### 3.2.1 Bypass Valve 입구 유량 계산

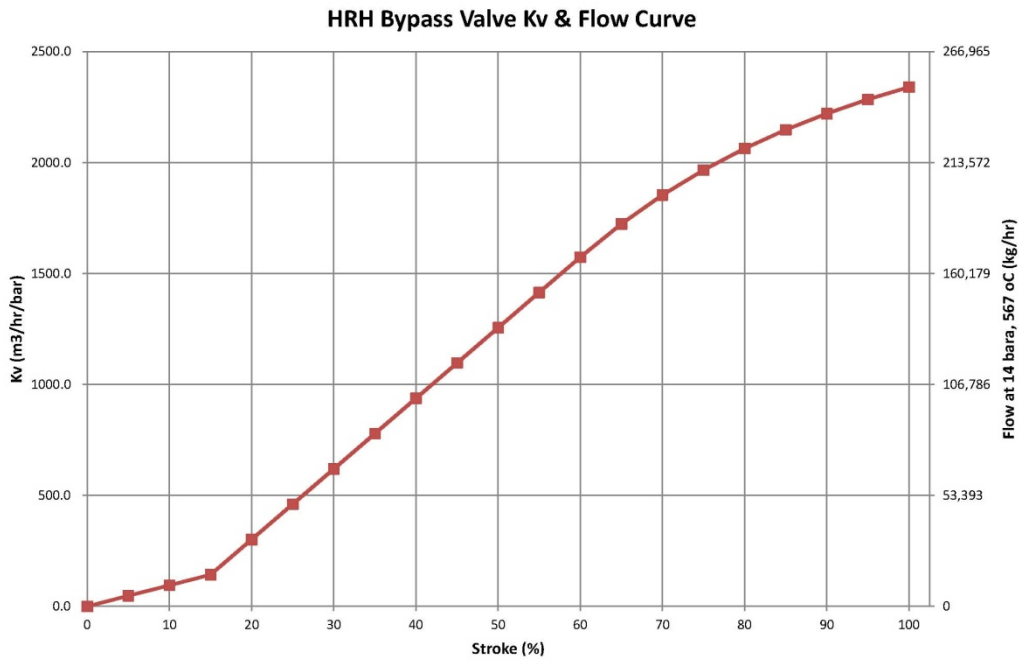
- 1) Valve Stroke %를 가지고 설계 조건에서의 입구 유량 계산

앞 절의 Forced Opening 에서 Bypass Valve 입구 유량을 가지고 Valve Stroke(%) 계산한 방법의 역순으로, Valve Stroke(%)를 가지고 Bypass Valve 입구 유량을 계산합니다.

앞 절에서 계산된, HRH Bypass Valve의 설계 Flow Capacity, Kv 값이 2107.0 m<sup>3</sup>/hr/bar로, 이는 "1 GT Base Load" Case로 입구 조건이 14 bar,a, 567 oC인 Choked 상태에서 225,000 kg/hr의 유량이 흐를 때 값입니다.

설계 Flow Capacity, Kv 값이 2107.0 m<sup>3</sup>/hr/bar 이므로, 제작자가 공급하는 HRH Bypass Valve의 최대 Kv 값은 설계 Kv 값의 최소 110% 이상, 즉  $2107.0 \times 1.1 = 2317.7$  m<sup>3</sup>/hr/bar 이상이 되어야 합니다.

제작자가 공급하는 HP Bypass Valve의 Kv 최대 값, 즉 100% Stroke에서의 값이 2340 m<sup>3</sup>/hr/bar 이라고 가정하고, Valve Characteristic이 Modified Linear 인 경우 Valve Stroke %에 대한 Kv 및 Flow Curve Sample은 아래 그림과 같습니다.



이를 테이블로 표시하면 아래와 같습니다.

Table 5, HRH Bypass Valve Stroke vs. Flow

| Stroke (%) | Kv (m3/hrbar) | Flow at 14 bara, 567 oC (kg/hr) |
|------------|---------------|---------------------------------|
| 0          | 0.0           | 0                               |
| 5          | 47.4          | 5,065                           |
| 10         | 94.9          | 10,129                          |
| 15         | 142.3         | 15,194                          |
| 20         | 301.3         | 32,176                          |
| 25         | 460.3         | 49,158                          |
| 30         | 619.4         | 66,139                          |
| 35         | 778.4         | 83,121                          |
| 40         | 937.4         | 100,103                         |
| 45         | 1096.4        | 117,084                         |
| 50         | 1255.5        | 134,066                         |



|     |        |         |
|-----|--------|---------|
| 55  | 1414.5 | 151,048 |
| 60  | 1573.5 | 168,029 |
| 65  | 1723.5 | 184,052 |
| 70  | 1853.7 | 197,946 |
| 75  | 1966.1 | 209,958 |
| 80  | 2063.4 | 220,343 |
| 85  | 2147.6 | 229,335 |
| 90  | 2220.7 | 237,142 |
| 95  | 2284.4 | 243,940 |
| 100 | 2340   | 249,881 |

위의 테이블에서, 설계 유량인 225,000 kg/hr 유량에서의 Kv 값과 Stroke(%) 값을 보간 법으로 구해 보면 아래와 같습니다.

$Kv \text{ at } 225,000 \text{ kg/hr} = (225,000 - 220,343) / (229,335 - 220,343) \times (2147.6 - 2063.4) + 2063.4 = 2107.0 \text{ (m}^3\text{/hr/bar)}$ 로 작성 기준과 동일한 값이 산출됩니다.

$\text{Stroke at } 145,000 \text{ kg/hr} = (225,000 - 220,343) / (229,335 - 220,343) \times (85 - 80) + 80 = 82.59 \text{ (\%)}$  값이 산출됩니다.

Table 5에서, Kv에 따른 유량 값은 ES\_StableIF97.EXE의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"으로 계산이 되지만, Stroke(%)에 따른 Kv 혹은 유량 값은 Valve Characteristic에 따라 달라지므로, Bypass Valve 제작자로부터 접수해야 합니다.

## 2) Correction Factor Table 작성하기

위의 Table 5은 입구 조건 14 bara, 567 oC 기준의 Choked 상태의 테이블이므로, 다른 입구 조건 및 Choked 상태가 아닌 경우의 보정 계수(Correction Factor) 테이블이 필요합니다.

ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"로, 다른 조건은 모두 동일하고 입구 압력만 달라지는 경우의 유량을 계산해서, 유량 보정 계수를 테이블로 만들면 아래와 같습니다.

Table 6, Flow - Inlet Pressure Correction Factor

| Inlet press,<br>bara | Flow, kg/hr | Corr. Factor<br>(MCFp) |
|----------------------|-------------|------------------------|
| 5                    | 80,156      | 0.3562                 |
| 7.5                  | 120,317     | 0.5347                 |
| 10                   | 160,534     | 0.7135                 |
| 12.5                 | 200,808     | 0.8925                 |
| 14                   | 225,000     | 1.0000                 |
| 17.5                 | 281,526     | 1.2512                 |
| 20                   | 321,970     | 1.4310                 |
| 22.5                 | 362,473     | 1.6110                 |
| 25                   | 403,033     | 1.7913                 |
| 27.5                 | 443,653     | 1.9718                 |
| 30                   | 484,331     | 2.1526                 |
| 32.5                 | 525,068     | 2.3336                 |
| 35                   | 565,865     | 2.5150                 |

동일한 방법으로 입구 온도에 따른 유량 보정 계수 테이블을 작성하면 아래와 같습니다.

Table 7, Flow - Inlet Temperature Correction Factor

| Inlet temp,<br>oC | Flow, kg/hr | Corr. Factor<br>(MCFt) |
|-------------------|-------------|------------------------|
| 400               | 253,940     | 1.1286                 |
| 425               | 248,876     | 1.1061                 |
| 450               | 244,111     | 1.0849                 |
| 475               | 239,616     | 1.0650                 |
| 500               | 235,364     | 1.0461                 |
| 525               | 231,331     | 1.0281                 |
| 550               | 227,499     | 1.0111                 |
| 567               | 225,000     | 1.0000                 |
| 575               | 223,851     | 0.9949                 |
| 600               | 220,371     | 0.9794                 |
| 625               | 217,047     | 0.9647                 |

위의 두 테이블은 Valve 가 Choked 상태인 경우의 보정 계수들입니다. Bypass Valve 가 Choked 상태가 아닌 조건에서 운전될 경우가 많지는 않지만, 만약의 경우를 고려하여, Choked 상태가 아닌 경우에 대한 보정 계수를 작성할 필요가 있습니다.

Choked 상태가 아닌 경우의 보정 계수는, Valve 출구 절대 압력을 입구 절대 압력으로 나눈, 압력비에 대한 보정 계수로 표시합니다.

Table 8, Flow - Pressure Ratio Correction Factor

| Inlet press, bara | Outlet press, bara | Press ratio | Flow, kg/hr | Corr. Factor (MCFpr) |
|-------------------|--------------------|-------------|-------------|----------------------|
| 14                | < 7.686            | < 0.5490    | 225,000     | 1.0000               |
| 14                | 7.686              | 0.5490      | 225,000     | 1.0000               |
| 14                | 8                  | 0.5714      | 224,740     | 0.9988               |
| 14                | 9                  | 0.6429      | 220,334     | 0.9793               |
| 14                | 10                 | 0.7143      | 209,989     | 0.9333               |
| 14                | 11                 | 0.7857      | 192,550     | 0.8558               |
| 14                | 12                 | 0.8571      | 165,596     | 0.7360               |
| 14                | 13                 | 0.9286      | 122,798     | 0.5458               |

Pressure Ratio 가 Critical Pressure Ratio 인 0.5490 이하인 경우에는, Choked 상태이므로 Choked 상태와 동일한 유량이 흐릅니다.

Correction Factor 작성 방법

위에서 작성된 Correction Factors 들은, Valve 가 일정한 Flow Capacity, Kv 값을 유지할 때, 즉 일정한 Opening 을 유지할 때, 설계 조건과 다른 조건에서 흐르는 유량의 설계 유량에 대한 비율입니다.

ES\_StableIF97.EXE 를 사용하여 위의 Correction Factor 들을 계산을 할 때, 임의의 Kv 값을 사용해도 되지만, 테이블에 표시된 유량들은 설계 값인 Kv = 2107.0 m3/hr/bar 를 사용해 작성한 값들입니다.

예를 들어, Table 2 에서 35 bara Inlet Press 에서의 유량 565,865 kg/hr 는, ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given)"에서 Inlet Press 값에 35 bara, Valve Kv 값에 2107.0 m3/hr/bar 을 입력하고 실행해서 구한 값입니다.

그리고, Correction Factor 2.5150 은, 565,865 kg/hr 를 설계 유량인 225,000 kg/hr 로 나누어 구한 값입니다.

### 3) 실제 조건에서의 Bypass Valve 입구 유량 계산 공식

앞서 수록된 테이블들에 표시된 Correction Factors 들은, Stroke(%)가 일정할 때의 유량 Correction Factors 들이므로, Stroke(%)을 가지고 유량을 구하고자 하는 본 계산에서는 이들 Correction Factors 들로 곱해 주어야 합니다.

즉, Table 5 에서 Stroke(%)를 가지고 보간 법으로 계산한 설계 조건에서의 유량을, 실제 조건의 유량으로 보정하기 위한 식은 아래와 같습니다.

$Q_d$  at Stroke(%) : Table 5 에서 보간 법으로 계산

$$Q_a = Q_d \times MCF_p \times MCF_t \times MCF_{pr}$$

- 주 :  $Q_a$  = Flow at Actual Condition, kg/hr  
 $Q_d$  = Flow at Design Condition, kg/hr  
 $MCF_p$  = Inlet Pressure Correction Factor (Table 6)  
 $MCF_t$  = Inlet Temperature Correction Factor (Table 7)  
 $MCF_{pr}$  = Pressure Ratio Correction Factor (Table 8)

### 3.2.2 Enthalpy 계산

HRH의 출구 Enthalpy 는 Set Enthalpy인 2768 kJ/kg으로 Operation Mode에 관계없이 일정합니다.

Spray Water Enthalpy 값은 Spray Water Temperature 값과 거의 동일하므로, Spray Water Temperature 값을 그대로 사용합니다.

문제는 Bypass Valve 입구 압력과 온도를 가지고 입구 Enthalpy를 구하는 방법입니다.

Steam Table 공식은 너무 복잡해서 Steam Enthalpy 계산을 위해 Steam Table 공식을 Plant DCS에서 사용할 수 없습니다. Plant DCS에서 Steam Enthalpy를 구하는 방법은, 필요한 압력 및 온도 영역의 Enthalpy 값을 Curve Fitting(= Regression Analysis)하여 식으로 구하는 방법과 테이블을 작성하여 보간 법으로 구하는 2가지 방법이 있습니다.

테이블을 사용하여 보간 법으로 구하는 방법보다는, Curve Fitting 식을 사용하여 구하는 방법이 더 정확할 수도 있지만, Curve Fitting 식을 사용하는 방법은 여기에서 소개하지 않고, 테이블을 사

용하는 방법을 소개합니다.

1) Correction Factor Table 작성하기

HRH의 설계 압력 및 온도가 14 bara 및 567 oC 이므로, 동 기준 상태에서의 Enthalpy 값인 3622.0 kJ/kg에 대한 Correction Factor Table를 작성해서 Steam Enthalpy를 계산합니다.

ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Water/Steam"로, 온도는 동일하고 입구 압력만 달라지는 경우의 Enthalpy 를 계산해서, 입구 압력에 대한 Enthalpy 보정 계수를 테이블로 만들면 아래와 같습니다.

Table 9, Enthalpy - Pressure Correction Table

| Inet press,<br>bara | Enthalpy,<br>kJ/kg | Corr. Factor<br>(HCFp) |
|---------------------|--------------------|------------------------|
| 5                   | 3629.8             | 1.0022                 |
| 7.5                 | 3627.6             | 1.0016                 |
| 10                  | 3625.5             | 1.0010                 |
| 12.5                | 3623.3             | 1.0004                 |
| 14                  | 3622.0             | 1.0000                 |
| 17.5                | 3619.0             | 0.9992                 |
| 20                  | 3616.8             | 0.9986                 |
| 22.5                | 3614.6             | 0.9980                 |
| 25                  | 3612.4             | 0.9973                 |
| 27.5                | 3610.2             | 0.9967                 |
| 30                  | 3608.0             | 0.9961                 |
| 32.5                | 3605.8             | 0.9955                 |
| 35                  | 3603.6             | 0.9949                 |

동일한 방법으로 입구 온도에 따른 Enthalpy 와 보정 계수 테이블을 작성하면 아래와 같습니다.

Table 10, Enthalpy - Inlet Temperature Correction Factor

| Inet temp,<br>oC | Flow, kg/hr | Corr. Factor<br>(HCFt) |
|------------------|-------------|------------------------|
| 400              | 3258.0      | 0.8995                 |
| 425              | 3311.9      | 0.9144                 |

|     |        |        |
|-----|--------|--------|
| 450 | 3366.0 | 0.9293 |
| 475 | 3420.2 | 0.9443 |
| 500 | 3474.7 | 0.9593 |
| 525 | 3529.4 | 0.9744 |
| 550 | 3584.4 | 0.9896 |
| 567 | 3622.0 | 1.0000 |
| 575 | 3639.7 | 1.0049 |
| 600 | 3695.4 | 1.0203 |
| 625 | 3751.5 | 1.357  |

2) Steam Enthalpy 계산 공식

설계 조건인 14 bara, 567 oC 에서의 Enthalpy 3622.0 kJ/kg 기준으로, 실제 압력 및 온도로 보정하기 위한 식은 아래와 같습니다.

$$H = H_d \times H_{CFp} \times H_{CFt}$$

- 주 : H = Enthalpy at Actual Condition, kJ/kg  
 H<sub>d</sub> = Enthalpy at Design Condition, kg/hr (3622.0 kJ/kg)  
 H<sub>CFp</sub> = Pressure Correction Factor (Table 9)  
 H<sub>CFt</sub> = Temperature Correction Factor (Table 10)

**3.2.3 Spray Water 유량 계산**

아래와 같은 Bypass Valve 전후의 Heat Balance 계산식으로부터 Spray Water 유량을 계산합니다.

$$Q_s = \frac{H_1 - H_2}{H_2 - H_s} Q_1$$

- 주 : Q<sub>s</sub> = Spray Water Flow  
 Q<sub>1</sub> = Bypass Valve Inlet Steam Flow  
 H<sub>1</sub> = Bypass Valve Inlet Steam Enthalpy  
 H<sub>2</sub> = Bypass Valve Outlet Steam Enthalpy  
 H<sub>s</sub> = Spray Water Enthalpy

### 3.2.4 예제 계산

< 측정 값 >

Bypass Valve Stroke = 90 %

Inlet Pressure = 35 bara

Inlet Temperature = 400 oC

Outlet Pressure = 32.501 bara

Outlet Enthalpy = 2768 kJ/kg (= H2)

Pressure Ratio = 32.501 / 35 = 0.9286

Spray Water Temperature = 30 oC

< 계산 >

입구 유량

Q1d at 90% Stroke = 237,142 kg/hr (Table 5)

MCFp = 2.5150 (Table 6)

MCFt = 1.1286 (Table 7)

MCFpr = 0.5458 (Table 8)

Q1a = Q1c x MCFp x MCFt x MCFpr = 237,142 x 2.5150 x 1.1286 x 0.5458 = 367,384 kg/hr

Enthalpy

HCfp = 0.9949 (Table 9)

HCft = 0.8995 (Table 10)

H1 = Hd x HCfp x HCft = 3622.0 x 0.9949 x 0.8995 = 3241.4 (kJ/kg)

Spray Water Enthalpy 값은 Spray Water Temperature 값과 동일하므로,

Hs = 30 kJ/kg

Spray Water Flow

Qs = (3241.4 - 2768) / (2768 - 30) x 367,384 = 63,521 (kg/hr)

< 오차 계산 >

입구 유량

Stroke 90%에서의 kv 값이 2220.7 m3/hr/bar 이므로, ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Steam C/V (Off-Design, Kv given" 으로 주어진 측정 값들을 입력해 계산하면, 아래 프로그램 화면 그림과 같이 Inlet Steam Flow 가 369,086 kg/hr 로 계산됩니다.

그러므로 입구 유량 계산 오차는  $1 - 367,384 / 369,086 = 0.46$  (%) 입니다.

The screenshot shows the ES\_StableIF97 software interface. The title bar reads "ES\_StableIF97 / New File (User : ENGSoft)". The menu bar includes "File(F)", "Option(O)", and "Help(H)". The toolbar contains icons for file operations and calculation. The main window is divided into several sections:

- Calculation:** A dropdown menu is set to "Steam C/V (Off-Design, Kv given)".
- Title:** A text field contains "Title1".
- Table:** A table with 3 columns: Item, Unit, and Value. The table contains 15 rows of data.
- Valve inlet:** Two dropdown menus are set to "Pressure" and "Temperature".
- Clipboard copy:** A button labeled "Clipboard copy".
- Options:** Two checkboxes, "Values only" and "incl. Notes", are both unchecked.
- List:** A dropdown menu is set to "List".
- Buttons:** Three buttons are visible: "Add to list", "Update list", and "Delete list".
- Text:** Three lines of text are displayed at the bottom: "Valve Nozzle Choking Press : 19.1381922048994", "Valve Inlet Sat. Temp. : 242.561711590615", and "Valve Nozzle Sat. Temp. : 238.340495854498".

| Item                  | Unit       | Value               |
|-----------------------|------------|---------------------|
| Inlet Press           | bar a      | 35                  |
| Inlet Temp            | oC         | 400                 |
| Inlet Dryness         |            | Steam(Sub-critical) |
| Inlet Enthalpy        | kJ/kg      | 3223.04264719854    |
| Inlet Flow            | kg/hr      | 369086.168280344    |
| Valve Back Press      | bar a      | 32.501              |
| Valve Nozzle Press    | bar a      | 32.501              |
| Valve Nozzle Temp     | oC         | 388.712421857953    |
| Valve Nozzle Dryness  |            | Steam(Sub-critical) |
| Valve Nozzle Enthalpy | kJ/kg      | 3201.2997243789     |
| Valve Nozzle Velocity | m/s        | 208.532600902794    |
| Valve Opening Area    | mm2        | 44035.2964505255    |
| Valve Kv              | m3/hr/bar  | 2220.7              |
| Valve Cv              | US gpm/psi | 2567.1292           |

### Enthalpy

ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Water/Steam"로 35 bara, 400 oC 에서의 Enthalpy 를 구해 보면 3223.0 kJ/kg 로, 오차를 계산해 보면  $1 - 3223.0 / 3241.4 = 0.57$ (%) 입니다.



Spray Water Flow

ES\_StableIF97.EXE 로 계산된 Bypass Valve Inlet Flow 369,086 kg/hr 를 가지고,  
 ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Desuperheating H/B (Inlet Flow given)"로 주어진 조건에 대해  
 계산하면, 아래 프로그램 화면 그림과 같이 Spray Water Flow 가 63,618 kg/hr 로 계산됩니다.  
 그러므로 Spray Water Flow 계산 오차는  $1 - 63,521 / 63,618 = 0.15$  (%) 입니다.

ES\_StableIF97 / New File (User : ENGSoft)

File(E) Option(O) Help(H)

Calculation: Desuperheating H/B (Inlet Flow given)

Title: Title1

| Item               | Unit  | Value               |
|--------------------|-------|---------------------|
| Inlet Pressure     | bar a | 35                  |
| Inlet Temperature  | oC    | 400                 |
| Inlet Dryness      |       | Steam(Sub-critical) |
| Inlet Enthalpy     | kJ/kg | 3223.04264719854    |
| Inlet Flow         | kg/hr | 369086              |
| Spray Pressure     | bar a | 25                  |
| Spray Temperature  | oC    | 30                  |
| Spray Enthalpy     | kJ/kg | 128.019760945636    |
| Spray Flow         | kg/hr | 63617.8513760692    |
| Outlet Pressure    | bar a | 32.501              |
| Outlet Temperature | oC    | 238.340495854498    |
| Outlet Dryness     |       | 0.980157983703096   |
| Outlet Enthalpy    | kJ/kg | 2768                |
| Outlet Flow        | kg/hr | 432703.851376069    |

List: [Empty List]

Inlet Sat. Temp. : 242.561711590615  
 Outlet Sat. Temp. : 238.340495854498

PR/DSH inlet: Pressure  
 PR/DSH outlet: Enthalpy

Buttons: Run, Clipboard copy, Values only, incl. Notes, Add to list, Update list, Delete list

## Appendix : Reheat Steam Turbine Bypass System Description

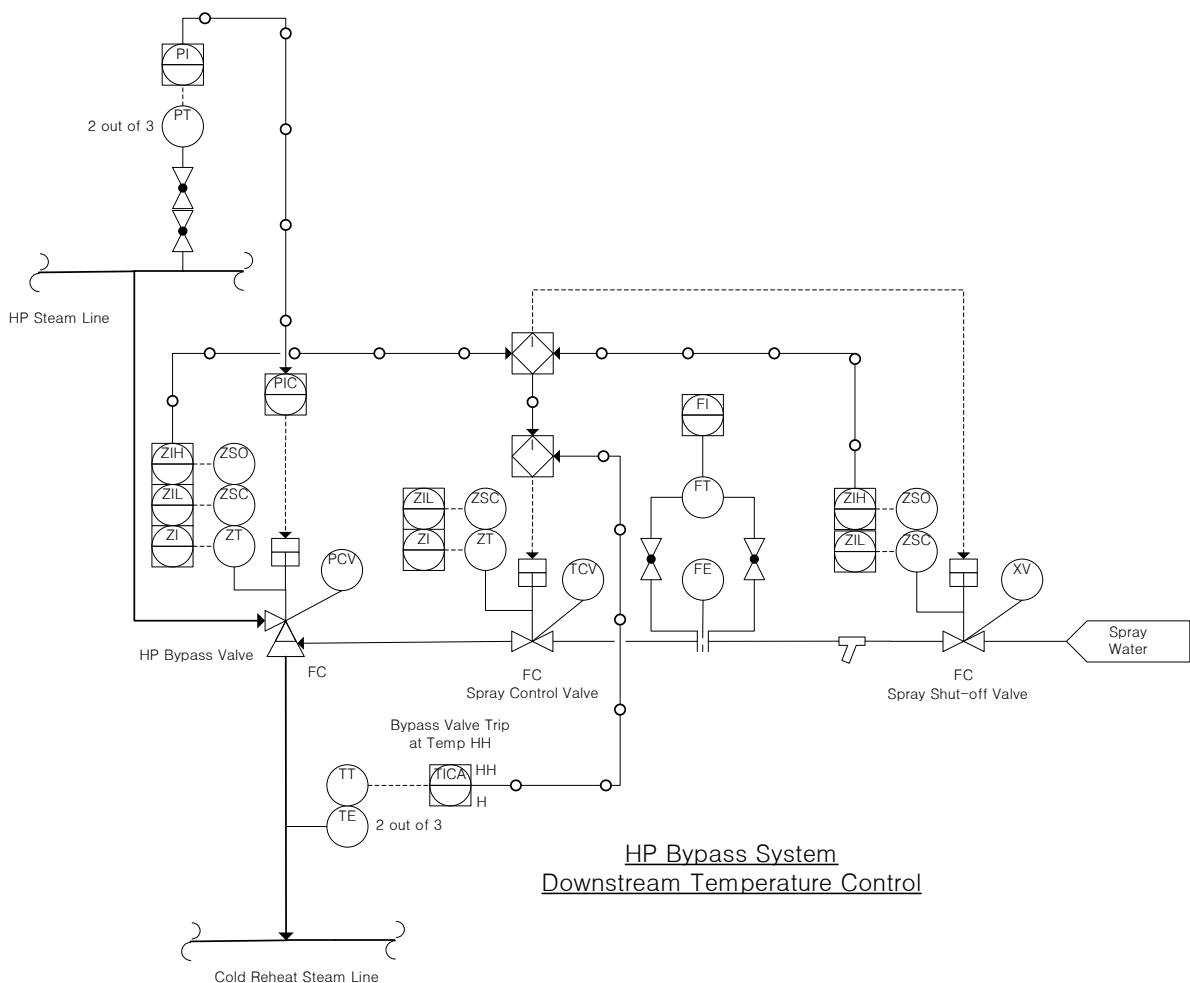
### 1. Bypass System P&ID

Steam Turbine Bypass System의 대표적인 P&ID는 아래 그림과 같습니다.

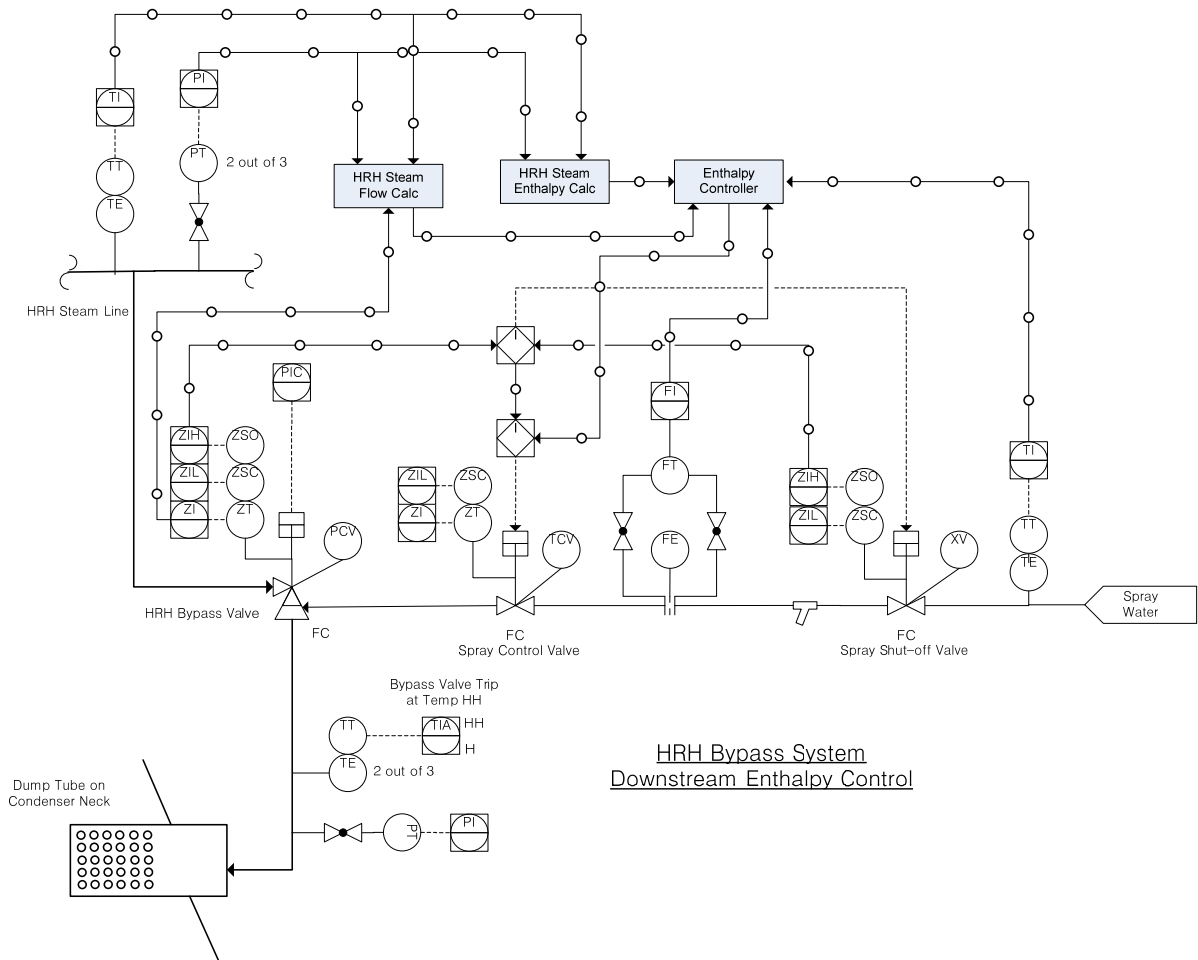
HP Bypass System은 HP Steam을 Cold Reheat Line으로 우회시키는 System이며, HRH Bypass System은 Hot Reheat Steam을 Condenser로 우회시키는 System입니다.

Reheat Steam Turbine의 경우 이들 2가지 Bypass System이 모두 필요하며, Non-reheat Steam Turbine의 경우에는 HRH Bypass System 만 필요한데, 이 경우 명칭이 HRH Bypass System 대신에 HP Bypass System이 되어야 합니다.

#### 1) HP Bypass System



## 2) HRH Bypass System



### Interlocks :

- ✧ Spray Water Control Valve 전단에 Power-operated Shut-off Valve를 설치하여, Spray Water Control Valve가 운전되지 않는 경우에 Power-operated Valve를 Close하여, Spray Water가 Leak되지 않도록 해야 합니다. Power-operated Shut-off Valve를 설치하지 않는 경우에는, Spray Water Control Valve의 Leakage Class를 VI 이상으로 선정하여 합니다.
- ✧ Spray Water Control Valve와 Power-operated Shut-off Valve는, Bypass Valve가 NOT Close 일 때만 Open 되도록 Interlock를 걸어 놓아서, Bypass Valve를 통해 흐르는 증기가 없는 상태에서 Spray Water가 분사되지 않도록 해야 합니다.
- ✧ Spray Water Control Valve는 Power-operated Shut-off Valve가 Full Open 된 경우에 운전 되도록 Interlock를 걸어 놓아야 합니다.

## 2. Bypass System의 운전

Bypass System은 아래와 같은 경우에 운전됩니다.

## 2.1 Steam Turbine Start-up 시

Steam Turbine(이하 ST)을 Start-up 하기 전에, Steam Generator(= Boiler)에서 생산되는 증기의 유량 및 압력, 온도를 ST Start-up을 위해 필요한 조건으로 만들기 위해 사용합니다.

ST가 정지되어 있던 시간에 따라 ST의 Metal Temperature가 달라지는데, 정지 기간이 긴 경우에는 궁극적으로 ST의 Metal Temperature는 주변 대기 온도까지 떨어질 수 있습니다.

그런데, ST Start-up을 위해 공급되는 증기 온도와 ST Metal Temperature와 차이가 크면, ST의 Thermal Stress가 커져서 ST의 내구성 측면에서 바람직하지 않으므로, Start-up 증기의 온도를 Metal Temperature 에 가능한 한 가깝게 근접시킨 다음 Steam Turbine을 Start-up 합니다.

Steam Generator에서 생산되는 온도는 Steam Generator에 의해 조절되지만, Steam Generator가 원하는 온도의 증기를 생산하기 위해서는 일정한 유량의 증기를 생산하여야만 하며, 그러한 일정 유량의 증기를 ST Start-up 이전에 ST를 Bypass 해서 흘리기 위해 Bypass Valve가 필요합니다. 즉, Bypass Valve가 Start-up 증기의 온도를 제어하는 것이 아니고, Steam Generator가 온도를 제어하기 위해 생산하는 증기의 유로를 형성해 주는 것입니다.

ST의 Metal Temperature에 따라 ST Start-up Mode를 정의하는데, 일반적으로 Cold Start-up, Warm Start-up, Hot Start-up으로 구분합니다. ST 업체에 따라서는 Very Hot Start-up Mode를 추가로 분류하기도 합니다.

Start-up Mode를 정지 시간에 따라 구분하기도 하지만, 가장 확실한 방법은 ST의 Metal Temperature에 따라 구분하는 방법입니다. 일반적으로, ST 업체에서 공급하는 Control System에서 ST Metal Temperature를 자체 측정해 Start-up Mode를 Control Signal로 제공하며, 아울러 Start-up Mode에 따라 공급 가능한 Steam Temperature도 ST 업체에서 문서로서 제공합니다.

ST Start-up을 위한 Steam 압력도 ST 업체에서 요구하는 압력이 있으며, Bypass Valve가 해당 Upstream Pressure를 Control 하여, ST 에서 요구하는 압력을 맞추어 줍니다.

ST가 기동을 하여 전력 계통(Grid)에 병입(Synchronization)을 하기 위해서는, 어느 정도 이상의 증기 유량이 필요한데, 이러한 증기 유량을 미리 확보하여, ST가 기동 및 계통 병입하는 동안에 ST의 요구에 따라 필요한 증기를 공급해 주는 역할을 Bypass Valve가 수행합니다.

실제적인 Control에서 Bypass Valve가 ST가 요구하는 증기 유량을 공급하는 Control Mechanism은 Bypass Valve의 Upstream Pressure Control 입니다. Bypass Valve가 ST 입구 압력(= Bypass Valve Upstream Pressure)을 Control 한다는 의미는, ST가 필요에 따라 증기를 사용하면 ST 입구 압력이

떨어지게 되며, ST 입구 압력이 떨어지면 Bypass Valve는 동 압력을 일정하게 유지하기 위해 닫히게 되어서, Bypass Valve을 통해 흐르는 유량이 줄어 들고, 그 만큼 ST로 흐르는 유량이 증가하는 Control Mechanism 입니다.

ST가 계통 병입 후 병입 상태를 유지하기 위해서는 최소 약 5%에서 10% MCR(Maximum Continuous Rating, 정격 출력) 부하를 유지해야 합니다. 그렇지 않으면 계통에 붙어 있지 못하고 계통으로부터 떨어져 나오게 됩니다.

ST 기동 전에 이러한 Minimum Load를 유지하기 위한 유량보다 최소 10% 이상 큰 유량을 Bypass Valve를 통해 확보한 상태에서 ST를 기동합니다. 그리고, ST가 기동하여 계통 병입이 되면, Bypass Valve는 자동적으로 거의 닫힌 상태가 되게 됩니다.

이 때 Bypass Valve의 Upstream Pressure Control을 Hold Mode로 전환해 Upstream Pressure Control을 못하게 한 후, ST를 Inlet Pressure Control Mode로 전환하고, Bypass Valve의 잔여 Opening을 강제로 닫아서, Bypass Valve의 Upstream Pressure Control을 종료시킵니다.

Bypass Valve의 Upstream Pressure Control을 종료시킨 후에는, Bypass Valve의 Pressure Control을 Floating Pressure Control로 전환합니다.

Floating Pressure Control이란, Bypass Valve의 Upstream Pressure Control의 Set Pressure 값을, 현재 Pressure + 3 ~ 5 bar 로 설정해서, Upstream Pressure Control의 Set Pressure가 현재 Pressure 보다 항상 3 ~ 5 bar 크게 유지되도록 합니다. 단, Set Pressure의 Change Rate를 Steam Generator의 Drum Pressure Change Rate 제한 값으로 설정합니다.

이렇게 함으로써, Upstream Pressure가 규정된 Change Rate 이하에서 상승할 때는 Bypass Valve가 열리지 않지만, 그 이상의 Rate로 상승할 때는 Bypass Valve가 열려서 Steam Generator Drum을 보호하도록 하는 것입니다.

Floating Pressure Control의 Set Pressure는 정격 압력(Rated Pressure) + 3 ~ 5 bar 이상으로는 상승하지 못하도록 하여, Upstream Pressure가 정격 압력 + 3 ~ 5 bar 이상으로 상승하는 경우에는 Bypass Valve를 통해 잉여 Steam을 배출함으로써 Steam Generator의 Safety Valve가 열리는 것을 방지합니다.

## 2.2 Steam Turbine Shut-down 시

ST를 Shut-down 하기 전에 우선 발전소의 정상 운전 Control System을 사용하여, ST Load를 ST 업체에서 규정한 Shut-down Load(약 25% MCR Load)까지 끌고 내려옵니다.

그런 다음, ST를 현재의 Load로 Hold 시킨 후, Bypass Valve의 Upstream Pressure Control의 Set Pressure를 현재의 Upstream Pressure로 설정하여, Bypass Valve를 Upstream Pressure Control로

전환합니다.

그런 다음, ST는 ST 자체의 Shut-down Control System에 의해 Shut-down 됩니다.

ST가 Shut-down 되는 동안에 ST에 유입되는 증기 유량은 감소하게 되고, 그 감소된 유량은 Bypass Valve의 Upstream Pressure Control Mechanism에 의해 Bypass Valve를 통해 흐르게 됩니다.

ST가 완전히 Shut-down 되어 Steam Generator에서 생산되는 모든 증기가 Bypass Valve를 통해 흐르게 되면, Bypass Valve를 Upstream Pressure Control로 그대로 유지한 상태에서, Steam Generator를 Steam Generator 자체 Control System을 사용하여 Shut-down 시킵니다.

Steam Generator가 완전히 Shut-down되어 Steam Generator에서 생산되는 증기가 없으면, Bypass Valve의 Upstream Pressure Control Mechanism에 따라 Bypass Valve가 완전히 닫히게 됩니다.

Bypass Valve가 완전히 닫히면 Bypass Valve Control을 Floating Pressure Control로 전환하여, Bypass Valve가 어떠한 경우에도 열리지 않도록 함으로써, Steam Generator Shut-down 이후에 Steam Generator Drum에 보관 중인 Drum Water 에너지가 Bypass Valve를 통해 빠져 나가지 못하도록 합니다.

### 2.3 Steam Turbine Trip 시

ST Trip 시 ST Emergency Stop Valve가 급격하게 닫히면, ST로 흐르던 유량을 Bypass Valve를 통해 Condenser로 안전하게 우회시켜 줌으로써, Steam Generator의 Safety Valve가 터지는 일이 없이 안전하게 Steam Generator를 Shut-down 시키거나, ST가 바로 재 기동 할 수 있는 상태인 경우에는 Steam Generator의 운전 상태를 이전 상태 그대로 유지하여 ST를 바로 재 기동할 수 있도록 해 줍니다.

그런데, ST Emergency Stop Valve가 닫히는 속도가 0.2 초 이내이어서, Bypass Valve를 정상적인 Upstream Pressure Control Mechanism에 맡기면, Control System 자체의 처리 속도 때문에 그 반응 속도가 늦어서 Upstream Pressure Control이 불가능합니다.

그러므로, ST가 Trip 됨과 동시에 ST Trip Signal을 ST Control System으로 부터 Hardwire Signal로 받아서, Bypass Valve를 미리 계산된 Opening으로 Forced Open 하여, 즉 강제로 열어서, Steam Generator의 Safety Valve가 터지지 않는 압력 이내로 Upstream Pressure를 제어합니다.

그리고 나서 Upstream Pressure가 어느 일정 압력으로 안정이 되면(혹은 어느 일정 시간이 경과

되면), Bypass Valve를 Upstream Pressure Control 로 전환합니다. 이때 Upstream Pressure Control의 Set Pressure는 Upstream Pressure Control로 전환되는 시점의 현재 Upstream Pressure 를 Set Pressure로 설정하여, Upstream Pressure Control로 전환되는 시점에 Control Hunting이 발생하지 않도록 합니다.

ST Trip 시에 ST Emergency Stop Valve의 Closing Time 0.2초에 대응하기 위하여, Bypass Valve의 Full Opening Time도 그에 상응하도록 짧아야 하는데, Full Opening Time이 2초 이하가 되도록 선정하는 것이 바람직합니다. Bypass Valve의 Full Closing Time은 짧은 필요는 없지만, 약 7 초 이하가 되도록 선정하는 것이 바람직합니다.

### 3. Bypass System의 Control

Bypass System이 수행하는 Control에는 아래 2가지 Control 이 있습니다.

- Upstream Pressure Control
- Downstream Temperature Control

#### 3.1 Upstream Pressure Control

##### 3.1.1 Control Logic

앞서 Bypass System의 운전에서 설명한 Upstream Pressure Control 기능으로, Bypass Valve가 담당합니다.

Upstream Pressure Control은 Control 대상인 압력의 측정 기기 반응 시간이 매우 짧아서, 간단한 Feed Back Control Logic으로 제어가 가능합니다.

Feed Back Control 이란, 당연한 얘기로 들리겠지만, 제어하고자 하는 Process Variable, 이 경우에는 Upstream Pressure 측정 값을 직접 Feed Back을 받아서 제어하는 Control 입니다. 즉, Control Signal을 보내서 Control Device를 작동한 후, 그에 따라 변하는 Process Variable 값을 보고 다시 Control Signal을 조정해 보내서, Process Variable 값이 원하는 값 즉 Set Value와 일치되도록 하는 Control Logic 입니다.

##### 3.1.2 Forced Opening

Bypass System의 Pressure Control에서 추가로 고려해야 할 사항은, ST Trip 시 Forced Open할 Opening을, ST 운전 중에 항상 계산해 가지고 있어야 한다는 점입니다. 그래서, ST Trip 시 지체 없이 그렇게 계산된 Opening으로 Bypass Valve를 가장 빠른 속도로 열어야 합니다.

Bypass Valve Opening을 계산할 때, Bypass Valve를 노즐(Nozzle)로 보고 계산합니다.

이상기체의 노즐 유량 및 임계 압력 비 계산 식은 다음과 같습니다.

$$\frac{W}{A} = \frac{\sqrt{2 g J C_p}}{R} \frac{p_1}{\sqrt{T_1}} \sqrt{r^{\frac{2}{k}} - r^{\frac{k+1}{k}}} \quad (\text{Eq. 1})$$

$$r_c = \left( \frac{2}{k+1} \right)^{\frac{k}{k-1}} \quad (\text{Eq. 2})$$

- 주 :
- W = 질량 유량
  - A = 노즐 목(Throat) 면적
  - p1 = 노즐 입구 절대 압력
  - T1 = 노즐 입구 절대 온도
  - r = 노즐 압력 비 = p2 / p1
  - p2 = 노즐 목(Throat) 절대 압력
  - k = 비열 비(Specific Heat Ratio) 혹은 등엔트로피 팽창 지수 (Exponent of Isentropic Expansion)
  - Cp = 정압 비열
  - g = 중력 가속도
  - J = Joule 상수, 열의 일당량
  - R = 기체 상수
  - r<sub>c</sub> = 임계 노즐 압력 비 = W/A 값이 최대가 되는 노즐 압력 비
    - r<sub>c</sub> = 0.5457 (k = 1.3)
    - r<sub>c</sub> = 0.5283 (k = 1.4)

위의 2 식을 살펴 보면 다음과 같은 내용을 알 수 있습니다.

- 노즐의 목 단위 면적당 질량 유량은 노즐 입구 절대 압력에 비례 함.
- 노즐의 목 단위 면적당 질량 유량은 노즐 입구 절대 온도의 제곱근에 반비례 함.
- 노즐의 목 단위 면적당 질량 유량은 어느 일정 압력 비에서 최대 값을 가짐.

노즐 목의 단위 면적당 질량 유량(W/A)이 어느 일정 압력에서 최대 값을 갖는다는 의미는, 동 W/A 값이 어느 일정 값에 도달하면 더 이상 증가하지 않는다는 의미이며, 이러한 상태를 질식(Choking) 상태라고 일컫습니다.

이는, 노즐의 압력 비가 1에서부터 감소하면, 초기에는 압력 비가 감소함에 따라 W/A 값이 증가하지만, 질식 압력 비 이상이 되면 더 이상 W/A 값이 증가하지 않고 질식 상태의 W/A 값을 유



지한다는 의미입니다.

위의 두 식을 고려할 때, 노즐로 해석되는 Bypass Valve의 Opening을 계산하기 위해서는 아래와 같은 값들을 알아야 한다는 것을 알 수 있습니다.

- Bypass Valve 입구 질량 유량
- Bypass Valve 입구 절대 압력
- Bypass Valve 입구 절대 온도
- Bypass Valve 출구 절대 압력

Bypass Valve의 압력 비가 질식 압력 비보다 크면 해당 압력 비를 가지고 Eq. 1 으로 계산을 하고, 압력 비가 질식 압력 비보다 작아서 질식 상태가 되면, 질식 압력 비( $r_c$ )을 가지고 Eq. 1으로 계산 하면 됩니다. Bypass Valve의 압력 비는 (Bypass Valve 출구 절대 압력) / (Bypass Valve 입구 절대 압력) 입니다.

과열 증기를 이상기체로 해석하는 경우 비열 비 값(k)으로 1.3을 사용하면 적정합니다. 그러므로, Bypass Valve의 압력 비  $r_c = 0.5457$  이하이면, Eq. 1에서 압력 비 값(r)으로 0.5457를 사용하여 계산하면 됩니다.

그런데 사실 증기는 이상기체와 달리 유동합니다. 특히, 포화증기의 경우에는 더욱 그렇습니다. ES\_StableIF97.EXE 의 Calculation "Choking Nozzle"를 사용하여, 과열증기와 포화증기의 질식 압력 비를, 100 bara 압력의 예를 들어 계산해 보면 다음과 같습니다.

| 항목               | 단위        | 과열 증기         | 포화증기          | 포화 수          |
|------------------|-----------|---------------|---------------|---------------|
| 노즐 입구 압력         | bar a     | 100           | 100           | 100           |
| 노즐 입구 온도         | oC        | 500           | 311.0         | 311.0         |
| 과열도              | oC        | 189           | 0             | 0             |
| 건도               |           | -             | 1             | 0             |
| 질식 압력            | bar a     | 54.84         | 59.23         | 76.39         |
| 질식 압력 비( $r_c$ ) |           | <b>0.5484</b> | <b>0.5923</b> | <b>0.7639</b> |
| 질식 유량            | Kg/hr/mm2 | 41.728        | 52.231        | 120.21        |

즉 과열증기의 경우 이상기체로 보고 계산해도 큰 무리가 없어 보이지만, 포화증기의 경우 특히 건도가 낮을수록 이상기체로부터 크게 벗어나는 것을 알 수 있습니다.

### 3.1.3 Bypass Valve의 입구 유량

Forced Open할 Opening을 계산할 때 먼저 알아야 할 항목이 유량입니다. 이 유량은 Bypass Valve 입구 배관에 설치되어 있는 유량계(Flow Meter)로부터 얻거나 혹은 ST의 First Stage Shell Pressure로 부터 계산해 얻는 방법이 있습니다.

입구 배관에 설치되어 있는 유량계 의 측정 오차는 보통 10% ~ 15% 정도 되는 것으로 알려져 있습니다.

반면에, Steam Turbine First Stage Shell Pressure를 이용해 계산되는 유량 값은, Steam Turbine을 노즐로 가정해 계산하는 값으로, 유량계 측정 값 보다 정확하다고 할 수 있습니다.

Bypass Valve Opening을 계산하기 위한 유량으로, ST First Stage Shell Pressure로부터 계산된 유량을 사용하되, 그렇게 계산된 유량 값을 재 확인하는 값으로 배관에 설치된 유량계의 측정 값을 사용하는 것이 바람직합니다.

Steam Turbine First Stage Shell Pressure를 이용하여 유량을 계산하는 공식은 Steam Turbine 제작자의 도움을 받아 작성해야 합니다.

### 3.2 Downstream Temperature Control

Bypass Valve가 Upstream Pressure Control을 하면서 통과시키는 증기는 Downstream System 으로 배출됩니다. HP Bypass Valve의 경우 Cold Reheat Line으로 배출되며, HRH Bypass Valve의 경우 Condenser로 배출됩니다.

그런데, Bypass Valve로 부터 배출되는 증기를 받아 들이는 Downstream System의 설계 압력 및 온도는 Upstream System의 설계 압력 및 온도보다 낮으므로, 그에 대한 대비책이 필요합니다.

압력의 경우, 통과되는 증기로 인해 Downstream System의 압력이 설계 압력보다 상승하게 되면, Downstream System의 Pressure Safety System이 보호를 하게 됩니다. Cold Reheat Line의 경우 Reheat System Safety Valves들이 보호를 하며, Condenser의 경우 Condenser Pressure Safety Valves 혹은 Rupture Disk 등이 보호를 합니다.

하지만 온도의 경우 Downstream System이 보호를 할 수 있는 수단이 없으므로, Bypass Valve 후단에서 요구하는 온도로 저감하여 배출해야 하며, 이를 위해 물 분사(Water Spray) 방식의 온도 저감 설비(Desuperheater 혹은 Attemperator)가 설치됩니다.

온도 저감 설비가 별도의 기기로 설치되는 경우도 있지만, Bypass Valve의 경우 분사되는 물이 충분히 Atomization이 될 수 있는 정도의 빠른 유속이 Valve Trim 통과 지점에서 발생하므로, 온도 저감 기기를 별도로 설치하지 않고 Valve Trim 바로 후단에 물을 직접 분사하여 온도 저감을 합니다.

분사되는 물의 요구 압력은, (Bypass Valve 후단 압력) + (물 분사 노즐 차압) + (물 분사 제어 밸브 차압) 보다 커야 하며, 일반적으로 Bypass Valve 후단 압력 + 10 ~ 15 bar 정도의 압력이 요구됩니다.

대부분의 경우 HP Bypass Valve의 분사 수는 보일러 급수 펌프 중간 단에서 취수하며, HRH Bypass Valve의 분사 수는 복수기(Condenser) 펌프 후단에서 취수 합니다.

#### 3.2.1 Control Logic

Pressure Control과 달리 Temperature Control Logic은 간단하지 않은데, 그 이유는 온도 측정 기기의 반응 속도가 늦기 때문입니다. 즉, 온도 측정 기기 주변 유체에 온도 변화가 발생했을 때, 온도 측정 기기가 변화된 온도 차이를 감지하는데 시간이 걸립니다.

일반적으로 온도 측정 기기의 반응 시간(Response Time)은, 변화된 온도 값의 63.2%가 측정되는 시간으로 정의됩니다. 동 반응 시간은 측정 기기의 종류 및 설치 조건, 유체의 성질 및 유속 등에 따라 달라지는데, Bypass Valve 후단에 일반적으로 설치되는 Thermocouple의 경우, 동 반응 시간이 약 30초 정도 되는 것으로 알려져 있습니다.

이는, 예를 들어, Bypass Valve 후단의 온도가 100 oC에서 200 oC로 순간적으로 변화되었을 때, Thermocouple 측정 값이 100 oC에서 163.2 oC로 읽히는데 30초가 걸렸다면, 동 Thermocouple의 Response Time은 30초 가 된다는 의미입니다.

그러므로, Pressure Control에서 사용하는 단순 Feed Back Control로서는 제어가 쉽지 않습니다. 특히, Steam Turbine Trip 시와 같이, 짧은 시간에 온도 변화가 큰 경우에는 거의 불가능 합니다.

Bypass Valve는 Steam Turbine 정상 운전 시 닫혀 있어서, Bypass Valve 후단의 온도는 Downstream System의 온도와 거의 동일합니다. 배관 주변 대기 온도가 낮은 경우에는, 배관의 보온 상태에 따라 달라지겠지만, 오히려 Downstream System의 온도보다 5~ 10 oC 정도 낮습니다.

예를 들어, 정상 운전 시의 Cold Reheat Line 운전 온도가 340 oC 이면, HP Bypass Valve 후단에 설치된 Thermocouple에 읽히는 온도는 330 oC 정도 됩니다. HRH Bypass Valve의 경우, 정상 운전 시 Condenser 운전 온도가 30 oC라고 하면, HRH Bypass Valve 후단에 설치된 Thermocouple에 읽히는 온도는, 배관 주변 대기 온도와의 차이가 크지 않으므로, 동일한 30 oC 정도 됩니다.

이러한 상태에서, Steam Turbine이 Trip 되어, Bypass Valve가 Forced Open 되어 뜨거운 증기가 갑자기 몰려 오는 경우, Bypass Valve의 Thermocouple은 뜨거운 증기 온도를 바로 읽지 못합니다.

Cold Reheat Line의 경우 정상 운전 시, Steam Turbine Load에 따라 온도 변화가 약 50 oC에서 60 oC 정도 발생합니다. 예를 들어, Steam Turbine 정격 부하에서 HP Turbine Exhaust 온도(= Cold Reheat Line 온도)가 340 oC 였다면, Steam Turbine 25% 정격 부하에서 HP Turbine Exhaust 온도는 400 oC까지 올라 갈 수 있습니다.

이 경우에, HP Bypass Valve Temperature Controller의 Set Temperature를 340 oC로 설정하고, Steam Turbine 25% 정격 부하에서 Steam Turbine이 Trip 되어 Bypass Valve가 Forced Open 되는 경우를 가정해 봅시다. 이 경우 HP Bypass Valve의 Temperature Controller의 Thermocouple은 약 60 oC의 급격한 온도 변화를 감지하여 제어해야 하는 상황에 놓이게 되는데, Thermocouple의 느린 Response Time 때문에 Feed Back Control을 사용해서는 제어가 쉽지 않습니다.

HRH Bypass Valve의 경우에는 그 온도 차가 더욱 큽니다.

HRH Bypass Valve의 경우 배출되는 고속의 증기가 Condenser Tube에 손상을 입히지 않도록 하기 위하여, Condenser 입구에 Dump Tube를 설치하며, 동 Dump Tube의 차압(Differential Pressure)이,

설계 조건에서 약 7 ~ 10 bar 정도 됩니다.

그러므로, HRH Bypass Valve 후단의 압력이 Condenser 압력이 아니고, 약 7 ~ 10 bara 정도의 높은 압력이 걸리게 됩니다.

Temperature Control의 Set Temperature는 포화 온도나 포화 온도 이하로 설정 할 수 없습니다. 포화 온도 이하로의 제어는 액상의 물이 되므로 제어할 수 없다는 것은 당연한 사실이고, 포화 온도로의 제어는 불특정 Enthalpy로의 제어가 되므로 이 역시 제어할 수 없는 상태입니다. 즉, Temperature Control의 Set Temperature는 최소 포화 온도 + 5 ~ 10 oC 이상 되어야 합니다.

HRH Bypass Valve 후단의 압력이 7 bara라고 가정할 경우, 7 bara 압력에서의 포화 온도는 165 oC 입니다. 그러므로, HRH Bypass Valve Temperature Controller의 Set Temperature는 아무리 낮춰도 170 oC 이상은 되어야 하며, 이 경우, Condenser 온도가 30 oC라고 하면, Steam Turbine Trip 시 Thermocouple은 약 140 oC의 급격한 온도 변화를 감지하여 제어해야 하며, 이는 HP Bypass Valve 보다 한층 더 열악한 조건입니다.

HRH Bypass Valve의 Temperature Control을 단순 Feed Back Control로 했을 때의 상황을, 위의 예를 들어 설명하면 다음과 같습니다. HRH Bypass Valve Inlet Steam 조건은 25 bara, 567 oC (Enthalpy 3612.4 kJ/kg) 로 가정합니다.

- Steam Turbine이 Trip 되어 HRH Bypass Valve가 정해진 Opening으로 Forced Open 됩니다. Opening Time은 약 2초 이내이며, Forced Open 되기 전에 Thermocouple 측정 온도는 30 oC 입니다.
- Forced Open이 되면 7 bara, 560 oC (엔탈피 3612.4 kJ/kg)의 증기가 배출되면서 Thermocouple의 측정 온도가 상승합니다. Thermocouple의 Response Time을 30초라고 가정하면, 30초 이후의 온도는  $30\text{ oC} + (560\text{ oC} - 30\text{ oC}) \times 0.632 = 365\text{ oC}$  이며, Controller Set Temperature인 170 oC에 도달하는 시간은, 온도 측정 값이 Linear하게 변한다면,  $(170\text{ oC} - 30\text{ oC}) \times 30\text{ 초} / (560\text{ oC} - 30\text{ oC}) / 0.632 = 12.5\text{ 초}$  입니다.
- Feed Back Control 인 경우, Forced Open 이후 12.5 초 동안은, 고온의 증기가 배출됨에도 불구하고, 측정 온도가 Set Temperature 보다 낮아 Spray Water Control Valve가 작동하지 않습니다.
- 12.5 초 이후에 Spray Water Control Valve가 작동해 물 분사를 시작하지만, 물 분사에 의해 온도가 저감된 증기가 Thermocouple에 도달하더라도, 이미 달구어지기 시작한 Thermocouple의 측정 온도는 계속 상승하여 Downstream System의 설계 온도를 초과하게 되고, Temp High-High Trip Logic이 작동하여 HRH Bypass Valve가 Trip Close 됩니다. 설계 온도가 충분한 여유를 가지고 있어서 HRH Bypass Valve가 Trip 되지 않고 계속 제어를 한다고 해도, 오랜 시간 동안 온도가 제어되지 않고 지그재그 Control이 될 것입니다.
- HRH Bypass Valve가 Trip Close 되면, Hot Reheat System의 Safety Valve가 Pop-up 되고,

Steam Generator Drum Level Low-Low 혹은 High-High에 의해 Plant Shut-down 으로 이어질 수 있습니다.

이러한 이유로, Bypass Valve의 Temperature Control은 Feed Back Control을 사용하지 않고, Feed Forward Control인 Enthalpy Control을 사용합니다.

HRH Bypass Valve의 경우 온도 차이가 커서 Enthalpy Control을 사용하지 않으면 제어가 거의 불가능하여 대부분의 경우 Enthalpy Control을 사용하지만, HP Bypass Valve의 경우 온도 차이가 비교적 작아서 중간 값으로 Set Temperature를 선정하면 비교적 안정적으로 제어가 가능합니다.

하지만, HP Bypass Valve도 보다 안정적인 온도 제어를 위해서는 Enthalpy Control을 적용하는 것이 바람직합니다. 정확한 온도로 제어할 필요가 없으므로, 굳이 Feed Back Control을 사용할 이유가 없습니다.

Enthalpy Control을 사용하더라도 Downstream Temperature를 정확히 제어할 수 있는 방법이 있습니다. 그 방법은, Enthalpy Control에 의해 제어된 증기의 Response Time 시간 동안의 평균 온도가 Target 온도와 일치하지 않는 경우, Enthalpy Set 값을 수정해 Target Temperature를 맞추는 방법입니다.

### 3.1.2 Enthalpy Control

Enthalpy Control은 Bypass Valve 전후의 Heat Balance 계산을 해서, Spray Water 유량을 계산한 다음, 계산된 Spray Water 유량이 분사되도록 Spray Water 유량을 제어하는 것입니다. 즉, Spray Water Control Valve가 Bypass Valve 후단의 온도를 제어하는 것이 아니고, 실제로는 Spray Water Flow를 제어하는 것입니다.

HP Bypass Valve의 경우, Enthalpy Control로 제어한다면, 증기가 배출되는 Cold Reheat Line의 설계 온도가 운전 온도 대비 충분한 여유를 가지고 있어, 정확하게 온도가 제어되지 않아도 문제가 되지 않으며, 더불어 Set Enthalpy가 충분한 과열도를 가지는 Enthalpy 이어서 습증기에 의한 Erosion 발생 가능성이 없으므로, 운전 온도 범위의 중간 값에 해당하는 Enthalpy를 Set Enthalpy로 선정해도 문제가 없습니다.

하지만 HRH Bypass Valve Set Enthalpy의 경우, 설계 온도가 낮은 Condenser 및 Steam Turbine Exhaust에 영향을 주지 않도록 비교적 낮은 Enthalpy로 선정해야 하는 동시에, 배관이나 Dump Tube 혹은 Condenser Tube에 습증기에 의한 Erosion을 유발하지 않아야 하므로, 또 너무 낮아도 안됩니다.

미국 HEI(Heat Exchange Institute)에서 발행한 "Standards for Steam Surface Condensers", Ninth Edition, December, 2002의 Addendum 1 에 아래와 같이 기술하고 있습니다.

(아래 시작)

#### 5.5 Turbine Bypass Guidelines

##### 5.5.2 Steam Conditioning

5.5.2.1 Steam inlet design values are not to exceed 1225 Btu/lb (2849 kJ/kg) and 250 psia (17.2 bara) to ensure the discharge is a vapor, and not a moisture laden mixture capable of creating impingement problems on internal components. External desuperheating devices that reduce enthalpy to 1225 Btu/lb must be located sufficiently upstream of the condenser to ensure adequate mixing of the attemperation fluid, such that when the steam reaches the condenser, superheated conditions are maintained. Superheat within the dispersion device should be in the 25 - 75 oF (13.9 - 41.7 oC) range. Wet steam is not permitted.

5.5.2.2 Occasionally turbine manufacturers set specific guidelines for maximum temperature at the interface of the turbine with the condenser. Main expansion joint manufacturers may also have temperature limits, which need to be taken into account. When such limitations are encountered, a cooling water spray curtain may be required within the condenser transition area to reduce local temperature excursions. The water spray should reduce temperature below 200 oF (93.3 oC). System delivery rate, pressure, and connection size must be coordinated with the condenser manufacturer.

(아래 끝)

즉, HRH Bypass Valve의 Target Enthalpy 는 "1225 Btu/lb (2849 kJ/kg)" 이하 이어야 합니다. 그리고, Dispersion Device(= Dump Tube) 내부 증기의 과열도가 "25 - 75 oF (13.9 - 41.7 oC)" 범위 이어야 하며, 습증기 이어서는 안 된다고 규정하고 있습니다.

일부 제작자의 경우 94% 건도 습증기까지는 허용된다고 하기도 하지만, 가능하면 HEI 규정에 따라 과열 증기를 유지하는 것이 바람직합니다.

#### 1) Spray Water 유량 계산

아래와 같은 Bypass Valve 전후의 Heat Balance 계산식으로부터 Spray Water 유량을 계산합니다.

$$Q_s = \frac{H_1 - H_2}{H_2 - H_s} Q_1 \quad (\text{Eq. 3})$$

- 주 :  $Q_s$  = Spray Water Flow  
 $Q_1$  = Bypass Valve Inlet Steam Flow  
 $H_1$  = Bypass Valve Inlet Steam Enthalpy  
 $H_2$  = Bypass Valve Outlet Steam Enthalpy  
 $H_s$  = Spray Water Enthalpy

## 2) Bypass Valve 입구 유량

앞서 설명한, Steam Turbine Trip 시 Forced Opening 계산을 위한 Bypass Valve 입구 유량은, Bypass Valve 입구 배관에 설치된 유량계로부터 읽어 들이거나, Steam Turbine First Stage Shell Pressure로 부터 계산하지만, Bypass Valve 운전 시 동 유량이 Bypass Valve 유량과 항상 같지 않기 때문에 동 유량을 Bypass Valve의 Enthalpy Control 목적으로 사용할 수 없습니다.

Bypass Valve 운전 시의 유량은, Bypass Valve의 Stroke(%)로부터 계산하거나. 아니면, Dump Tube 가 설치된 경우에는, Dump Tube 입구 압력으로부터 계산합니다.

Bypass Valve 및 Dump Tube를 노즐(Nozzle)로 보고 해석하면, Bypass Valve의 Enthalpy Control에 사용하기에 충분한 정확도를 가지는 유량을 계산할 수 있습니다.

Bypass Valve는, 목(Throat) 면적이 가변(Variable)인 노즐로 해석하며, Stroke(%)로부터 Bypass Valve(즉 노즐) 목 면적을 계산하고, 입구 압력 및 온도 그리고 출구 압력을 측정해 Bypass Valve 의 입구 유량을 계산하는 것입니다.

Dump Tube는, 노즐 목 면적이 고정(Fixed)된 노즐로 해석하며, Dump Tube Opening Area(= 노즐 목 면적)와 Dump Tube 입구 압력을 가지고 Dump Tube 입구 유량, 즉 Bypass Valve 출구 유량을 계산하는 것입니다.

Dump Tube로 계산하는 경우, Dump Tube 입구 온도와 출구 압력을 계산에서 사용하지 않는 이유는, Dump Tube 입구 온도는 운전 중에 거의 일정하다는 가정이며, 출구 압력은 Dump Tube가 운전 중에 거의 대부분 질식 상태로 운전된다는 가정에서 사용하지 않는 것입니다.

하지만, Dump Tube 입구 온도와 출구 압력도 변할 수 있으므로, Dump Tube를 사용해 유량을 계산하는 방법은 경우에 따라 정확하지 않을 수 있습니다.

Dump Tube를 사용해 유량을 계산하는 경우 또 하나 결정적인 단점이 있습니다. Steam Turbine Trip 시 Forced Opening할 때, Dump Tube에 증기가 도착해서 Pressure Build-up이 될 때까지 어느 정도의 시간이 걸리며, 그 시간 동안, 실제로는 Bypass Valve를 통해 고온은 증기가 흐



르고 있음에도 불구하고, 유량이 흐리지 않은 것으로, 혹은 적게 흐르는 것으로 계산이 되어, Spray Water 분사가 이루어지지 않거나 부족하게 분사되는 단점이 있습니다.

그러므로, Dump Tube가 설치되는 Bypass Valve의 경우에도, Enthalpy Control을 위한 유량은, Dump Tube의 입구 압력을 측정해 계산하기 보다는, Bypass Valve의 Stroke(%)로부터 계산하는 것이 바람직합니다.

(끝)