

- 絶縁耐力 試驗후 전회檢査內容과 比較 絶縁劣火 推移를 검토하여 事故를 未然에 防止토록 誘導.
- 計劃豫防整備詩 터빈 베어링, 브레이드, Roter, 기어박스등 機器 및 材質에 대한 整備爲主로 하는것을 터빈 및 발전기계통에 대한 保護 Interlock 試驗까지 하여 機器에 대한 安全性 確保와 試驗記錄등을 書類化 誘導.
- 負荷運轉시 전회檢査 記錄과 比較하여 機器에 대한 老朽化 및 문제점을 豫測하여 計劃豫防備詩 修理 및 交替로 事故를 未然에 防止 誘導.
- 計劃豫防整備 期間에 檢査를 實施하도록 案内하여 整備 및 運轉員과 같이 發展設備에 관한 重要事故內容, 豫防整備內容, 履歷管理事項, 停電豫防등을 파악 및 相互意見 交換하여 設備의 信賴性 確保로 企業 競爭力 강화에 기여.

III. 結論

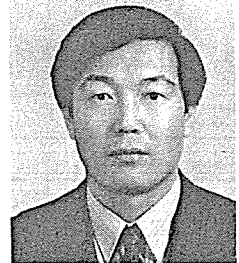
發電設備는 原動力設備인 보일러(Boiler), 터어빈

(Turbine)과 電氣設備인 발전기(Generator), 변압기(Step-Up. Tr), 차단기(C.B) 및 附屬機器로 구성된 綜合的인 시스템(System)으로 各種 設備의 保護系統과 安全系統이 電氣的인 信號를 서로 주고 받으면서 高速으로 回轉하여 에너지(蒸氣·電氣)를 生産하는 設備이므로 제작사(Maker)에서 추천하고 있는 發電時間 및 起動停止 횟수등을 基準으로 하는 計劃豫防整備 週期를 遵守하고 설비운영자와 법정검사자가 공동으로 忠實한 法定檢査를 수행하여 設備의 安全確保와 良質의 에너지를 持續的이고 安定的으로 供給 할 수 있도록 하여야 겠다.

安全管理를 遵守하는 것이 費用의 支出이라고 생각할 수도 있으나, 生産에 置重하여 計劃豫防整備期間을 지키지 않을 경우 設備의 疲勞累積으로 인한 事故 및 燒損으로 에너지 供給에 蹉跌이 發生할 수 있으며, 이는 企業 競爭力強化의 沮害要因으로 作用 할수 있다는 것을 共感하는 機會가 되기를 바랍니다.

발전설비의 성능시험 및 계산

김 경 철
한국전력공사 전력연구원
성능관리팀 과장
(042)865-5112



1. 성능시험 절차

가. 성능시험 목적

발전설비의 精確한 性能을 파악하기 위해서는 발전설비에 공급된 열이 어디에서 어떻게 分배되는가 하는 열의 흐름을 精確히 하는 것이 무엇보다 重要하며 이와같이 발전 플랜트에 공급된 열의 이용 정도를 알기 위하여 열의 출입을 各항목별로, 즉 연료의 연소에서부터 발전기까지 進行하는 과정에서 열의 발생, 흡수·손실등의 過程을 分析하여 관리하

는 것이 性能시험의 主要한 任무이다.

한편 性能시험은 各各의 목적하는 바에 따라서 다음과 같이 分류한다.

(1) 인수성능시험(Acceptance Test)

신구발전소 건설시 또는 設비의 대규모 개조시 계약보증性能 확인을 위하여 실시하는 性能시험으로 設비완료후 3개월이내 실시한다.

(2) 주기적 성능시험(Periodic Performance Test)

기존 발전설비에 대한 性能변화 추이의 파악, 보수 필요점 分析 및 효과파악을 위하여 주기

적으로 실시하는 성능시험

- (3) 특수목적 성능시험(Performance test special purpose)
설비개선, 연료전환개조 등의 공사전·후의 필요한 자료수집 또는 효과 분석을 위하여 실시하거나 또는 효과적인 운전을 위하여 특별히 실시하는 시험

나. 시험전 준비사항

- (1) 시험에 사용될 연료, 특히 고체연료는 가능한 설계조건에 적합하고 시험기간중에 일정한 품질을 유지할 수 있도록 사전에 준비한다.
- (2) 설비정비 : 전 발전설비 계통에서 증기, 급수, 공기, 가스등의 누설부와 미분기 계통, 회처리계통의 고장개소는 시험전 보수한다.
- (3) 시험출력확보 : 계통에 연계된 발전설비의 출력 또는 열부하를 일정계획별로 확보한다.
- (4) 계측장비의 설치
 - 온도, 압력, 유량, 전력량, 등 측정항목에 따른 적절한 범위의 계측장비를 선정한다.
 - 시험목적에 알맞게 선정된 계측기의 교정을 확인하고 설치한다.
 - 설치된 계측기의 동작상태 점검 및 이상시는 즉시 조치하여 수정한다.

라. 시험시 허용 운전편차

항 목	정격치에 대한 허용편차	시험평균치에 대한 순시치의 허용한계
출 력	±5%(규정부하)	±0.25%
주증기 압력	±3%(절대압)	±0.25% 또는 0.35ata중 큰것
주증기 및	±16℃ (과열도 30℃이상)	±2℃ (좌동)
재열증기 온도	±8℃ (과열도 15~30℃)	±4℃ (좌동)
급수온도	±6% (최종 Heater 출구)	-
배기압력	-	±1.0% 또는 ±1.2mmHg중 큰것
1차유량	-	차압의 ±1.0%
주기유량	±5%	-
속 도	±5%	±0.25%

마. 시험의 진행

- (1) 시험준비가 완료되면 시험요원의 정위치
- (2) 시험개시 5분전부터 Count-Down을 시작
- (3) 기록시간이 되면 Control Room의 Page Phone등의 신호방법을 이용하여 정확한 기록시각을 알림.

(5) 자료준비

- 성능시험 기록지
- Isolation List 작성
- 계산에 필요한 Calibration Sheet, Correction Curve, Tank Table, 연료성분 분석치등
- 성능분석에 필요한 보일러 및 터빈과 각 주요 보조기기에 대한 정비 및 이력사항

다. 시험전 운전조작 사항

- (1) 시험개시 2시간 전까지 Cycle Isolation Schedule에 따라 Valve 조작을 완료(불명분 손실유량이 주증기 유량의 0.1% 이내일 경우 계통격리 양호)
- (2) 석탄화력의 경우 시험개시 3시간전까지 부하 및 혼소율을 시험치로 조정
- (3) 시험전 Soot Blowing 및 Bottom Ash 처리
- (4) F.O Strainer, Burner Tip등을 청소
- (5) Flue Gas 분석을 실시하여 O₂%를 시험치로 맞춤
- (6) 시험 실시전에 2시간 이상의 부하 안정시간을 두어 전체 Cycle의 열적평형상태 유지
- (7) 출력은 Load Limiter로 시험부하를 유지하고 보일러 계통은 자동운전

- (4) 시험진행요원은 현장을 순시하면서 기록의 정확성과 운전상태의 정상여부를 설계치, 인수치, 전 시험치 또는 기존 계측기 지시치를 이용하여 비교 Check
- (5) 시험기간중에는 긴급한 상황을 제외하고는 운전조건을 변경하지 않도록 해야하며, 가

능한 한 기기의 정비작업도 피해야 함.

- (6) 시험중의 설비가 사전에 예상한 기준조건을 벗어날 경우 이를 측정 및 기록
- (7) 성능시험이 정상적인 상태에서 예정된 지속 시간을 경과하게 되면 시험을 종료하고 아래사항을 진행
 - 시험용 기록지 회수 및 확인
 - 시험용 계측기의 전원 차단 및 필요시 덮개를 씌워 계측기를 보호
 - 석탄화력의 경우 Bottom Ash Sampling 작업확인
 - Cycle Isolation 해제
 - 발전소 운전상태 정상화(Governor Free 운전실시 등)
 - 필요시 계측기의 Zero Point 확인

2. 열효율 개요

가. 보일러 열효율

(1) 보일러 열효율

보일러 열효율은 보일러의 입력으로 들어가는 Energy 가운데 몇%가 유효한 Energy로 출력되는가를 나타내는 것으로서, 이의 산정방법은 크게 입출력법 (Input-Output Method)과 열손실법(Heat Loss Method)의 2가지로 나눌 수 있다.

입출력에 의한 효율은 보일러에 공급된 총입열에 대한 열흡수량(또는 유효출열)의 비를 백분율로 나타낸 것이며, 열손실법에 의한 효율은 총입열 100%에서 각종 손실을 빼내어 산정하는 것이다.

(2) 입출력법에 의한 효율

입출력법에 의한 효율산정을 위해서는 연료사용량, 고위발열량, Heat Credit(부가열입력)등 보일러 입열에 속한 항목과 물 또는 증기등의 작동유체가 흡수한 열량, 즉 보일러 열흡수량(출력)의 정확한 측정이 요구된다.

그러나 발전설비 대형화 추세에 따라 보일러에 사용되는 물, 증기, 연료량의 규모도 커지게 되나 사용 계측기의 정도 영향으로 인한 오차가 커서 그 정밀한 측정이 어려운 실정이며, 또 측정이 가능하더라도 이에는 많은 비용이 소요되므로 대용량 보일러의 정밀 성능시험에는 이 방법이 부적합하다고 볼 수 있다.

(3) 열손실법에 의한 효율

열손실법에 의한 효율산정을 위해서는 각종 열손실, Heat Credit(부가 열입력) 산정과 연료의 원소분석, 고위발열량의 측정이 필요하다.

열손실법은 입출력법에 비하여 비용이 적게드는 것을 제외하고도 많은 장점이 있다.

• 정밀도와 관련하여 살펴보면 열손실법에서의 총손실은 약 10~20%에 불과하므로 연료 Sampling이나 분석상의 오차는 그 결과에 미소한 영향을 미치는데 반하여, 입출력법에서는 이러한 오차가 적어도 4~5배의 영향을 미치게 된다.

• 열손실에 의한 시험은 그 결과를 손실항목별로 예상 또는 설계성능과 쉽게 비교할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

• 열손실법에는 중요 손실 산정에 필요한 항목, 예를 들어 연료분석, 보일러 출구가스 온도, 입구공기 온도, 미연탄소함량등을 쉽게 측정할 수 있으며 기타 경미한 손실도 ASME PTC-4등에 수록된 지침이나 계산방법등을 이용하여 쉽게 구할 수 있다. 따라서 보일러 성능시험은 열손실법이 일반적으로 채용되고 있으며 입출력법은 참고용으로 이용하고 있다.

2. 보일러 효율 계산

가. 계산기준

- 열손실법 (입출력법 참고)
- 기준 공기온도 : FDF Suction 주위 외기온도 또는 A/H 입구온도
- 연료발열량 : 소비식 고위발열량
- 연료의 원소분석치 : 건식기준으로 분석된 결과치에 총수분을 보정하여 적용
- 배기가스온도 : 공기예열기 출구온도
- 가스분석치 : AH In&Out O₂, CO₂, CO분석치
- 공기중 습분 : 대기압, 건·습구온도 측정치로부터 계산

나. 열손실 항목

- 건배기가스 손실
- 미연탄소분 손실
- 연료중의 수소연소에 의한 수분손실
- 연료중의 수분손실
- 연소용 공기중의 습분손실

- 분무용 증기손실
- CO생성손실
- 복사 및 대류손실(방열손실) : 설계치 적용
- 미측정 손실 : Ash Pit 열손실, Flue Dust 현열 손실, 미연수소, 탄화수소손실, 미분류 손실 등

다. 보일러 효율계산

(1) 입출력법(Input-Output Method)에 의한 효율

$$\eta_g = \frac{\text{보일러 출력}(Q_{\text{abs}})}{\text{보일러 입력}(Q_i)} \times 100(\%)$$

$$= \frac{Q_{\text{SH}} + Q_{\text{RH}} + Q_{\text{X}} + Q_{\text{AE}} + Q_{\text{BD}} + Q_{\text{LO}}}{Q_{\text{fe}} + B_e} \times 100(\%)$$

여기서,

보일러 출력(Q_{abs})

Q_{SH} = 과열증기의 흡수열량

Q_{RH} = 재열증기의 흡수열량

Q_{X} = 보조증기의 흡수열량

Q_{AE} = Steam Air Ejector 증기의 흡수열량

Q_{BD} = 보일러 Blow Down의 흡수열량

Q_{LO} = BWCP 밀봉수 누설의 흡수열량

보일러 입력(Q_i)

Q_{fe} = 연료의 화학적 연소열

$$= W_{\text{fe}} \times H_f$$

W_{fe} : 연료 소비량(kg/h)

H_f : 연료의 고위발열량(kcal/kg)

B_e = Heat Credit

$$= B_{\text{Ae}} + B_{\text{ze}} + B_{\text{fe}} + B_{\text{xe}} + B_{\text{mAc}}$$

B_{Ae} : 연소용 공기의 보유열량

B_{ze} : 분무용 증기의 보유열량

B_{fe} : 연료의 보유현열

B_{xe} : 보일러 Envelope내의 보조기기 동력환산열

B_{mAc} : 연소용 공기중의 수분 보유열량

(2) 열손실법(Heat Loss Method)에 의한 효율

$$\eta_g = \frac{\text{보일러 출력}}{\text{보일러 입력}(H_f+B)} \times 100(\%)$$

$$= \frac{\text{보일러 입력}(H_f+B) - \text{보일러 열손실}(L)}{\text{보일러 입력}(H_f+B)} \times 100(\%)$$

$$= \left(1 - \frac{L}{H_f+B}\right) \times 100(\%)$$

가) 보일러 입력

보일러 입력은 입출력법에서의 입력과 같음.

$$Q_i = H_f + B$$

나) 보일러 열손실

$$L = L_{\text{e}} + L_{\text{G}}' + L_{\text{mf}} + L_{\text{H}} + L_{\text{mA}} + L_{\text{z}} + L_{\text{m}} + L_{\beta} + L_{\text{p}} + L_{\text{d}}' + L_{\text{r}}' + L_{\text{um}}$$

L_{e} : 미연탄 열손실

L_{G}' : 건배기 가스 열손실

L_{mf} : 연료중의 수분 열손실

L_{H} : 연료중 수소의 연소시 생성되는 수분에 의한 열손실

L_{mA} : 연소용 공기중의 수소 열손실

L_{z} : 분무용 증기 열손실

L_{co} : 일산화탄소(CO) 생성에 의한 열손실

L_{β} : 복사 및 대류 열손실

L_{p} : Ash pit에서의 열손실

L_{d}' : Flue Dust의 현열손실

L_{r}' : 미분기 Reject 열손실

L_{um} : 기타 미측정 손실

3. 공기에열기 성능계산

가. 계산기준

- 공기에열기 입출구 공기 및 가스온도
- 공기에열기 입출구 가스분석치 (O_2 , CO_2 & CO)
- 공기에열기 입출구 공기중 습분량 및 가스중의 수분량
- 공기에열기 출구 무누설 환산 가스온도

나. 성능계산 항목

- 가스측 온도효율 : $(T_{\text{GI}} - T_{\text{GONL}}) / (T_{\text{GI}} - T_{\text{AI}}) \times 100(\%)$
- 공기누설율 : $(\text{AH출구습가스량} - \text{AH입구습가스량}) / \text{AH입구습가스량} \times 100(\%)$
- 기타 열관류율, 열회수율, 열용량비 등

4. 터빈 열효율

가. 터빈 성능 개요

보일러에서 발생된 증기는 터빈에 유입되어 터빈내 부에서 팽창하고 그 일량은 발전기를 회전시켜 전력을 발생한다. 이때 일량의 일부는 Bearing 등 기계적 손실과 발전기 손실로 된다. 터빈 배기압력까지 팽창한 증기는 복수기로 유입 냉각되어 복수가 되지만 증기가 갖는 열량은 복수기 냉각수에 발열된다. 터빈의

성능을 표현하는데는 열소비율(열효율)을 쓰고 있으며 이 밖에도 증기소비율, 내부효율 등이 있다.

나. 터빈 열소비율(Turbine Heat Rate)

열소비율이란 1kw의 전력을 발생하는데 소비된 시간당의 열량이 얼마나 되는가를 나타낸 것으로 다음과 같이 정의된다.

$$\text{열소비율(kcal/kWh)} = \frac{\text{열소비량(Heat Consumption)}}{\text{발전기 출력(Output)}} = \frac{\text{공급열(Heat Supplied)-반환열(Heat Returned)}}{\text{발전기 출력(Output)}}$$

여기서 공급열이라 함은 외부로부터 터빈계통에 공급된 열량을 말하며, 주증기와 재열증기가 터빈에 가지고 들어오는 열량이 가장 주된 공급량이 된다. 그외 외부로부터 터빈계통에 유입되는 각종 Drain의 보유열량, 보충수가 가지고 들어오는 열량, 보일러로부터 공급되는 공기추출기 구동증기의 보유열량 등이 있다. 반환열은 터빈계통 으로부터 외부의 다른 설비에 반환(유출)되는 열량을 말하며, 최종급수가열기출구 급수의 보유열량, 재열기유입증기 보유열량, 과열기 및 재열기의 Spray Water 보유열량등이 보일러로 반환되는 주된 반환열이 된다.

그외 터빈으로부터 공급되는 보조증기의 보유열량 등이 반환열에 해당된다. 그러나 탈기 Vent, Sampling, Pump Gland 누설등과 같이 외부설비로 반환되지 않는, 즉 Plant에 유용하게 이용되지 못하고 무효하게 버려지는 터빈 사이클 손실 열량은 반환열로 취급하지 않는다.

터빈 열소비율은 보일러 발생증기의 증기조건, 복수기의 진공도, 급수온도나 급수가열기단수등 열싸이클의 조건과 터빈 본체의 자체성능에 의해 좌우된다. 이중 증기조건은 운전에 의하여 좌우되므로 특히 설계치 유지에 힘써야 한다.

다. 터빈효율계산

(1) 터빈효율계산 개념

- 열소비율 = 소비열량/발전기 출력 = (공급열-반환열)/발전기 출력[kcal/kwh]
- 열효율 = 860 × 발전기 출력 / (공급열-반환열) × 100(%)
- 공급열 : 주증기, 재열증기, 터빈에 유입되는

각종 드레인 유체, 보충수 및 공기추출기 구동증기의 보유열량

- 반환열 : 최종 급수가열기 출구의 급수, 고압 터빈 출구 증기 및 과열 저감수의 보유열량 (탈기 Vent, Sampling, Pump Gland Leakage Flow등은 반환열이 아니며 손실열임.)

(2) 터빈 효율계산 절차

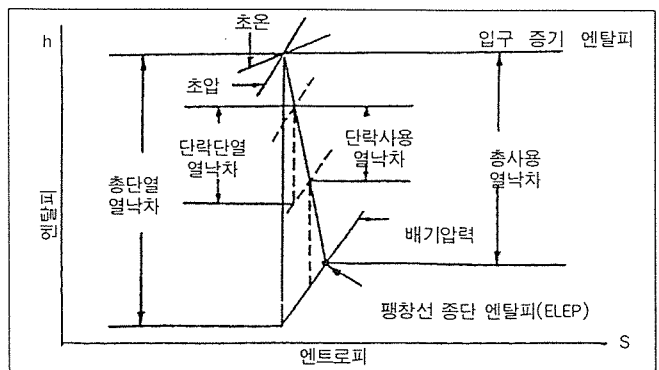
- 측정된 온도, 압력 Data 검증 및 엔탈피 계산
- 기준유량 및 각 저장조 수위변동량 계산을 위한 비중량 계산
- 터빈 내부효율 산출을 위한 단열엔탈피 계산
- 위의 Data와 기준유량 차압, 출력등 성능계산에 필요한 Data입력
- 기준유량 산출(유량계수 확정 입력등)
- ELEP계산 (저압터빈 배기손실값 입력등)

라. 터빈 팽창선도 및 내부효율

(가) 팽창선도(Expansion Line)

터빈 팽창선도는 터빈 실린더에서의 열기의 팽창 상태를 나타내는 것으로서, 설계기준 및 시험결과의 팽창선도로부터 터빈 성능평가가 수단으로 유효한 자료이다.

다음의 그림은 고압터빈 팽창선도의 예를 도시한 것이다. 여기서 각 단락(Stage)의 증기 조건을 전부 측정하는 것은 불가능하나, 급수가열기 추기의 조건을 터빈 Flange에서 측정하고, 또한 각 실린더 출구의 증기 조건을 측정하여 Mollier 선도에 구성, 팽창선도를 그릴 수 있다.



<터빈 단락간 증기 상태점의 궤적을 통한 팽창선도>

다만 저압터빈 출구의 증기조건은 습증기이므로 터빈·발전기 사이클의 Energy Balance계산에 의해 간접적으로 산출해 내는 방법이나, 설계치 엔탈피를

이용하여 진공도변화에 대해 수정하는 방법을 사용하고 있다.

(나) 터빈 내부효율(Internal Efficiency)개념

입력 증기가 배기압까지 팽창함에 있어서 실제적인 일로 변화된 열량, 즉 실제 팽창선의 사용열낙차(Used Energy)와 손실이 없는 증기의 이론 일량인 단열열낙차(Available Energy)와의 비를 말한다.

$$\text{내부효율} = \frac{\text{사용열낙차(Used Energy)}}{\text{단열열낙차(Available Energy)}}$$

터빈 내부효율은 일반적으로 고압, 중압 및 저압터빈으로 구분하여 계산한다.

터빈은 Nozzle이나 Blade등에 Scale이 부착한다든지 외부로부터의 이물 유입에 의한 손상 등에 의해서 성능에 크게 영향을 받는다. 그러므로 터빈 내부효율을 산출하여 터빈보체의 성능을 판정하고 이상발견에 힘써야 한다.

(다) 터빈 내부효율

터빈 내부상태의 양, 부의 확인과 각 단락간의 Packing Seal 간극증대로 인한 누설량 증가여부의 판단에 유용하게 활용되며, 다음번 예방정비시의 정비 필요성 자료도 제공해 주는바, 내부효율의 저하는 설비상으로는 Blade&Nozzle의 침식과 Scale부착 Packing누설량 증대로 인하여 일어나며, 운전상으로는 무엇보다도 주증기의 온도, 압력과 재열증기온도가 정격치로 유지되는나에 달려있다.

• 첫단압력 및 첫단압력비 추세를 파악하여 첫단의 상태를 추정해보는 것으로써 압력비 증가시는 Scale부착, 감소시는 침식영향을 생각할 수 있으며, 이렇게 첫단압력을 이용하는 것은 측정이 쉽고, 터빈의 기계적인 상태가 나빠지지 않는 한 재현성이 좋으며, 계통 운전변화에 큰 영향을 받지 않는다는 점 때문이며

• 어느 특정 추기점의 압력이 증감되었을 때인데, 압력이 증가된 경우에 하류측 추기점과 동반한 경우는 해당단을 포함한 하류측에 Scale부착등으로 증기통로면적이 감소된 것으로, 하류측 추기압력의 변화가 없으면 해당단을 포함한 상류측의 흐름제한이 있는 것으로 의심해야 하며, 압력이 감소한 경우는 침식의 영향일 가능성이 큰 것으로 추정해 볼 수 있고

• 어느 특정 추기점의 온도가 상승한 경우인데, 이때는 바로 앞 단락의 내부 Seal 간극증대로 인한 누설량 증가 영향인 경우가 대부분이며

• 고압터빈 출구온도인데 개략적으로 고압터빈 내부효율을 짐작케 해주는 요소로써 온도가 서서히 증가시는 침식, 관석부착, 누설량 증가등에 의한 내부효율 저하를 의미하며, 급격히 증가시는 외부에서 유입된 이물질등으로 터빈손상이 일시적으로 크게 발생했음을 예상케 해준다.

끝으로 고압터빈 첫 추기점의 온도으로써, 일반적으로 고압터빈의 성능저하는 주로 첫단을 포함한 앞단에서 발생하므로 고압터빈 출구온도와 함께 터빈 내부상태를 추정하는 유용한 Data로 활용할 수 있음.

따라서 어느 한 부하를 기준삼아 지속적으로 추이를 관찰하여 이상이 있는곳은 예방정비시 집중적으로 점검, 정비를 하여 터빈 성능향상을 도모할 수 있을 것이다.

5. 복수기 성능계산

가. 계산기준

- 복수기 열부하
- 냉각수 입출구온도
- 복수기 진공도

나. 성능계산 항목

- 관청정도 : 시험치 열관류율/기준 열관류율 ×100(%)
- 종단온도차 : 복수기 진공상당 포화온도-냉각수 출구온도[℃]
- 기타 냉각수 온도상승, 냉각수량 등

6. 급수가열기 성능계산

가. 계산기준

- 추기의 온도, 압력 및 드레인온도
- 추기압력상당 포화온도
- HTR입출구 급수온도

나. 성능계산 항목

- 종단 온도차 : 추기압력상당 포화온도-급수 출구온도[℃]
- 드레인 접근온도차 : 드레인 온도-급수 입구온도[℃]
- 급수 온도상승 : 급수 출구온도-급수 입구온도[℃]