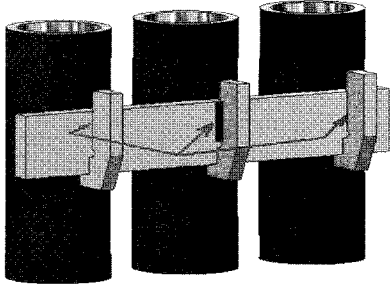


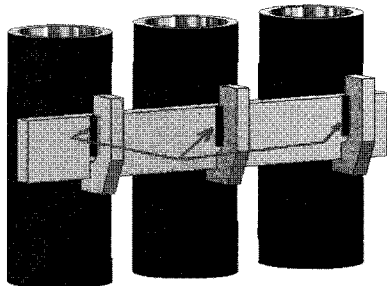
나. 시공시 착안사항

- Tube 열팽창에 따른 신축이동을 고려하고 도 시위치만 용접한다.

다. 관련도면 및 시방



[그림 14.1] Support Bar 중앙 튜브만 용접 (Good)



[그림 14.2] Support Bar가 전부 용접됨 (Bad)

- Tube 열팽창을 구속해서는 안 된다.
- Coil의 열팽창 구속은 관 배열의 이탈을 촉진한다.

15. Tube Spacer Bar 용접

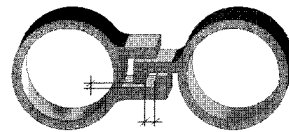
가. 관리항목

- Spacer Bar Gap(최소 1mm, L-Type)을 확보한다.

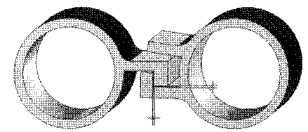
나. 시공시 착안사항

- Tube 열팽창에 따른 신축이동을 고려하고 Spacer Bar 간극을 확보하여 튜브의 열이탈을 방지한다.

다. 관련도면 및 시방



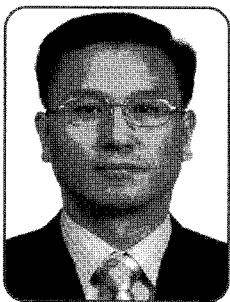
[그림 15.1] Spacer 적정 간극 유지 (Good)



[그림 15.2] 간극이 없거나 너무 큼(Bad)

<출처 : 일본 히타치 기술자료>

증기터빈 성능시험 및 성능분석 기법(2)



한전전력연구원
엔지니어링센터
책임연구원/황광원
Tel : (042)865-7591

6. 증기터빈의 기본 특성(압력, 온도 및 유량 관계)

가. 단락특성

대부분의 터빈은 여러 단락으로 구성되어 있지만 3가지로 구분할 수 있다.

1) 첫 단 성능 : 부하에 따라 변한다. 부분부하 운전시 유량이 감소하므로 압력비(출구압력/입구압력)가 감소하고 증기속도가 증가하므로 속도비(Wheel 속도/이론 증기속도)가 적정 설계 값을 벗어나게 되어 효율이 저하된다.

2) 중간단락 성능 : 운전조건이 변하더라도 거의 일정한 압력비로 운전되므로 성능변화가 거의 없다.

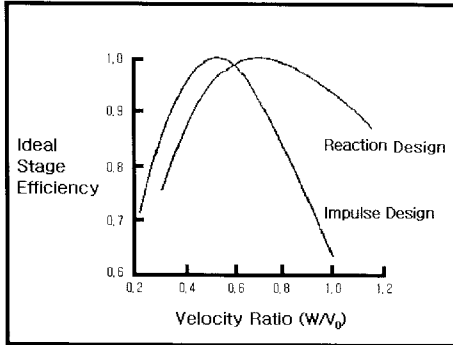
* 중간단락에 대한 유량 관계식(St. Venant's Equation)

$$W / \sqrt{P_1 / v_1} = W / (P_1 \sqrt{1 / (R_1 \times T_1)})$$

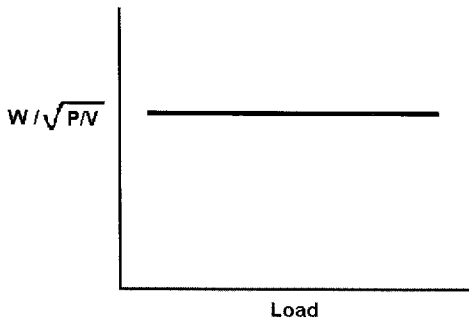
$$= \text{constant}, \therefore W / P_1 \approx C$$

단, W는 유량(kg/h), P는 압력(kg/cm²), v는 비체적(m³/kg), R은 일반가스정수, T는 절대온도(°K), 첨자 1은 단락입구 증기조건, 첨자 2는 노즐출구 증기조건임.

이 식은 제어밸브개도가 일정시 첫 단에도 적용되며, 또한 주증기압력, 복수기 압력 및 제어밸브개도가 일정시 최종 단에도 적용된다.



[그림 5] 터빈에서의 속도비와 효율과의 관계곡선



[그림 6] 중간단락의 유량관계곡선

☞ 이 식을 정리하면

- ① 단락 입구압력 : 유량에 직접 비례(최종 단 제외)
- ② 주증기압력 증가 : 비례적으로 유량 증가
- ③ 주증기온도 증가 : 유량 감소
- ④ 재열증기온도 증가 : 유량일정, 재열압력증가, 고압터빈 압력강하율 감소
- ⑤ 첫 단 압력 : 유량에 직접 비례
- ⑥ 첫 단 노즐면적 증가 : 첫 단 압력 및 유량증가(2단에 유입되는 유량이 증가하므로)
- ⑦ 첫 단 노즐면적 감소 : 첫 단 압력 및 유량감소
(동일 제어밸브개도 하에서 증기통과유량이 감소하므로)
- ⑧ 2단 유로면적 감소 : 첫 단 압력증가 및 유량감소
- ⑨ 첫 단 이외의 다른 단락 유로면적 감소 또는 유량 증가 : 해당 단락의 입구 압력 증가

3) 최종 단 성능 : 부하 및 복수기 압력에 따라 변한다. 입구압력은 부하에 따라 비례하고 배기압력은 냉각수온도에 따라 결정되며, 압력비의 변화는 모두 유출속도 변화로 나타나게 된다.

나. 주증기압력 변화의 영향

터빈에 공급되는 증기압력은 증기의 가용에너지 양을 결정한다. 터빈 증기압력이 증가하면 압력-체적 에너지는 증기의 총 에너지와 비례하여 증가한다. 가용에너지를 제공하는 것은 증기의 압력-체적 에너지이기 때문에 그 크기를 최대로 만들면 터빈 사이클의 효율이 개선된다.

교축압력이 증가하면 터빈 사이클 효율과 터빈 출력이 모두 증가한다. 증기의 총 에너지(엔탈피)는 압력이 높아지면 감소한다. 단, 터빈은 가용에너지의 대부분을 높은 교축압력에서의 증기로부터 회수한다. 그 결과 복수기 배압이 일정하다고 가정할 경우 터빈 사이클의 효율이 증가한다.

동일 제어밸브개도 하에서 주증기압력의 증가는 터빈의 최종 단을 제외한 모든 단락에서 비례적인 압력증가와 주증기량 증가를 가져오며, 터빈 최종 단의 경우, 입구압력은 개략적으로 주증기압력 증가에 직접 비례하여 증가하나 배기압력은 변하지 않는다.

다. 주증기온도 변화의 영향

주증기온도는 고압터빈에 공급되는 증기의 총 에너지(엔탈피)를 결정한다. 증기온도가 상승하면 터빈 사이클 효율이 향상된다. 단, 증기의 비체적은 온도가 상승하면 증가하므로 따라서 터빈을 통해 흐르는 질량유량이 적어지기 때문에 일정한 제어밸브개도 하에서의 터빈 출력은 감소한다.

만약 주증기압력과 제어밸브개도가 일정한 상태에서 주증기온도가 증가하면 주증기량은 감소한다. 첫 단 및 후속단락도 압력비가 일정하게 운전되므로 주증기온도가 변하면 단락입구 온도도 따라서 변한다. 그러나 만약 재열증기온도 조정이 잘 이루어진다고 가정하여 재열증기온도가 일정하게 운전된다면, 주증기온도와 더불어 일어나는 고압터빈 증기유량 감소는 고압터빈출구와 재열터빈입구에서 압력 감소를 유발한다. 따라서 고압터빈에서의 총 입력강하는 증가한다. 하지만 주증기온도의 영향은 비교적 적다.

라. 재열증기온도 변화의 영향

재열증기온도가 낮으면 터빈 사이클 효율에 악영향을 미친다. 재열증기온도가 낮으면 중압과 저압터빈에 공급되는 증기 단위질량당 엔탈피 값이 작아진다. 따라서 복수기 조건이 일정하다고 가정할 경우 중압과 저압터빈이 증기에서 추출하는 에너지의 양이 감소된다. 이 경우 터빈 사이클의 효율과 발전기 출력이 감소된다.

또한 중압터빈으로 공급되는 증기의 과열도가 낮아진다. 결과적으로 증기가 저압터빈을 통해 팽창하는 과정 중 초기에 응축이 발생하므로 저압터빈에서 팽창이 완료되는 시점에서의 수분 함유량이 증가된다. 이러한 두 가지 요인에 의해 발생하는 물방울은 터빈 블레이드에 제동 작용이 되어 저압터빈 출력이 감소된다.

한편 증기에 수분이 과도하게 존재할 경우 저압터빈의 최종 단 블레이드에 수분에 의한 침식이 발생된다.

주증기조건과 제어밸브개도가 일정한 상태에서 재열 증기온도가 증가하면 재열터빈의 모든 압력은 증가하며, 고압터빈 총 압력강하의 감소를 가져온다. 재열증기 온도 감소는 이와 반대의 영향을 미친다.

마. 복수기압력의 영향

복수기압력은 저압터빈에서 배기증기에서 추출되는 에너지의 양을 결정한다. 복수기의 압력이 낮으면 저압터빈은 더 많은 에너지를 추출한다. 따라서 터빈 사이클 효율이 증가한다.

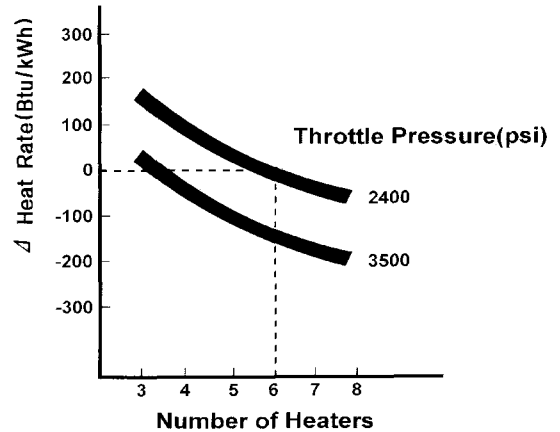
터빈이 수행하는 일은 터빈을 통과하는 증기의 압력(엔탈피) 강하에 정비례한다. 복수기압력이 높아지면 터빈에서의 압력강하 폭이 감소하므로 터빈이 증기에서 회수하는 에너지의 양이 감소하게 된다. 복수기압력이 정격치 대비 1 mmHg 증가할 때마다 터빈 사이클 열소비율은 약 1 kcal/kWh 증가하며, 부하가 낮을수록 그 증가율은 높아진다.

복수기압력이 낮아지면 터빈에서 배기되는 증기의 비체적이 증가한다. 배기 환상면적의 고정부를 통과하려면 증기의 속도가 높아져야 한다. 그 결과 터빈에서의 배기손실이 증가하며, 이는 증기의 운동에너지를 나타낸다. 따라서 특히 터빈 부하가 높은 상태(증기 유량이 많을 경우)에서 복수기압력이 과도하게 낮으면 배기손실이 증가하기 때문에 효율에 부정적인 영향이 미치는 시점이 발생한다.

바. 재생사이클의 영향

급수가열기에서 급수는 추기의 열(잠열 포함)을 모두 흡수하기 때문에 터빈의 추기를 사용해 급수를 가열하

면 터빈 사이클 열소비율이 개선된다. 만일 이 추기증기가 급수가열에 사용되지 않는다면 이 증기는 터빈을 통해 팽창된 후 복수기로 배기된다. 이럴 경우 보유열은 급수에 흡수되는 대신 순환수로 손실된다.



[그림 8] 급수가열기 수와 터빈 열소비율과의 관계

사. 첫 단 노즐면적 변화의 영향

고형미립자(SPE; Solid Particle Erosion) 또는 다른 인자에 따른 침식(Erosion)에 의해 첫 단 노즐면적이 증가한다면 동일한 터빈입구 증기조건과 동일한 제어밸브개도에 대해 주증기량 및 압력은 증가할 것이다. 왜냐하면 2단에 유입되는 유량이 증가하기 때문이다. 한편, 침전물(Deposit) 퇴적 등에 의해 첫 단 노즐면적이 감소한다면 첫 단 입구압력은 주증기압력으로 일정하기 때문에 첫 단에 통과되는 유량 및 압력이 감소하게 된다.

아. 단락출구 압력의 영향

단락출구 압력이 증가하면 단락입구 압력도 따라서 증가하지만 출구압력 증가만큼 오르지 않는다. 유량이 일정하다고 가정할 때 단락출구 압력변화에 따른 입구 압력 변화에 대한 계산식은 다음과 같다.

$$P_1 \times (P_1 - P_2) = P_1' \times (P_1' - P_2')$$

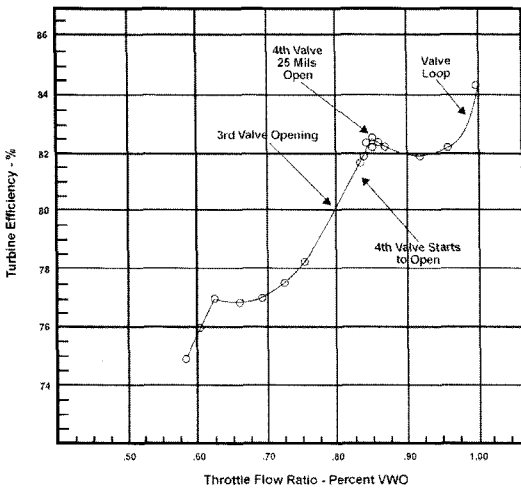
단, 첨자 '는 변화된 압력, 첨자 1은 단락입구 압력, 첨자 2는 단락출구 압력임.

자. 터빈 단락효율(Turbine Stage Efficiency, Enthalpy Drop Efficiency)의 영향

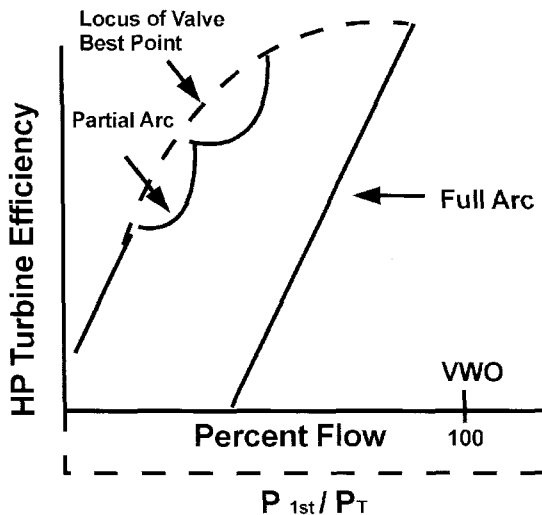
1) 고압터빈 엔탈피강하효율

부하에 따라 민감하게 변하는 즉 [그림 8]에서처럼 주증기량에 따라 변하는 유량의 함수다. 밸브 점들 사이의 효율은 제어밸브에서의 교축손실 때문에 밸브 점에

서의 효율보다 낮다. 첫 단은 노즐면적이 변할 수 있는 유일한 단락으로 터빈이 밸브전개 상태에서 운전될 때 첫 단 압력비는 약 0.8이며 유량이 최대가 된다. 제어 밸브가 닫힐 때 주증기량이 감소하게 되므로 첫 단 압력비는 감소하고 이론 증기속도는 증가하고 증기속도에 대한 터빈 Wheel 속도의 비도 감소한다. 이것은 증기가 설계조건을 벗어난 각도로 회전익 열에 유입되어 효율저하의 결과를 가져오며, 또 유출속도손실 증가에도 영향을 준다. 고압터빈의 첫 단 이외의 단락은 일정한 압력비로 운전되므로 제어밸브개도에 관계없이 거의 일정하게 효율이 유지된다.



[그림 8-1] 부하별 고압터빈 엔탈피강하효율 1

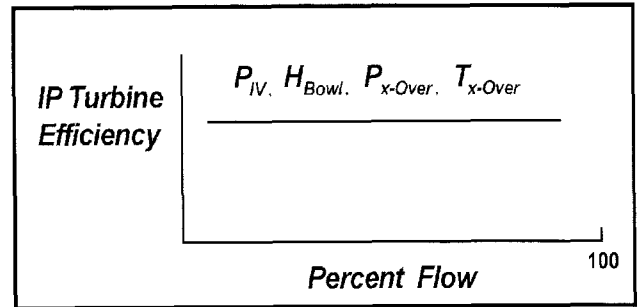


[그림 8-2] 부하별 고압터빈 엔탈피강하효율 2

2) 중압터빈 엔탈피강하효율

일정한 압력비로 운전되므로 주증기량에 관계없이 거의 일정하게 효율이 유지된다. 한편 중압터빈의 효율이 기대했던 값보다 훨씬 높게 나타나는 경우가 있다. 이러한 현상은 고압 및 중압터빈이 한 케이스 내에 결합되어

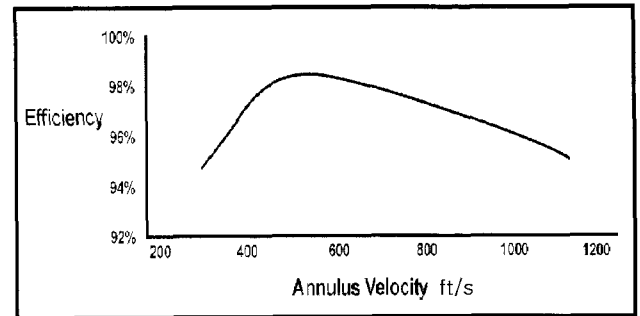
있고 주증기와 재열증기가 서로 반대방향으로 흐르는 설비에서 나타난다. 만약 고압 및 중압터빈 사이의 패킹(일반적으로 N2 Packing 이라 함)이 많이 마모되어 고압터빈의 증기가 중압터빈 Bowl로 누설된다면, 이 누설증기는 일반적으로 중압터빈 Bowl보다 차가우므로 중압터빈출구 엔탈피를 낮추는 영향을 주고 있다. 따라서 중압터빈효율은 실제효율보다 높게 계산되어 마치 중압터빈효율이 상승된 것처럼 잘못된 정보를 얻게 되는 경우가 종종 있다. 그러므로 중압터빈효율은 고압터빈에서 누설되는 증기영향을 고려하여 판단할 필요가 있다.



[그림 9] 부하별 중압터빈 엔탈피강하효율

3) 저압터빈 엔탈피강하효율

증기유량의 변화에 따라 최종단의 유출속도손실과 부적절한 회전의 열의 증기유입 각에 의한 손실이 변하므로 효율이 변하게 된다.



[그림 10] 부하별 저압터빈 엔탈피강하효율(UEEP 기준)

차. 제어밸브의 영향

하나 이상의 제어밸브를 완전히 또는 부분적으로 닫음으로써 증기유량을 조절할 수 있다. 교축압력이 일정하다고 가정할 경우 밸브를 부분적으로 닫으면 유량통과면적이 감소하므로 제어밸브의 출구측(노즐블록) 증기압이 감소한다. 제어밸브의 제한된 면적을 통과하는 동안 증기는 유속은 증가하고 압력은 낮아진다. 이 과정을 교축이라고 한다. 교축에서 증기에 포함된 총 에너지는 수행되는 일이 없기 때문에 변하지 않는다. 가장 중요한 영향은 압력강하로서, 터빈이 증기에서 추출할 수 있는

가용에너지의 양이 줄어든다는 것이다. 터빈 블레이드에서 일을 하기 전에 교축이 되면 터빈에 전달되는 증기는 제어밸브의 입구쪽 증기보다 가용에너지의 양이 적다. 결과적으로 터빈의 기계적 효율이 감소해 열소비율 증가를 초래한다.

또한 부분부하에서는 특정 노즐 아크만 사용된다. 회전 블레이드 1단 열의 아크를 가동노즐 아크와 정렬하면 가동되지 않는 노즐 아크를 통과하면서 와류가 형성된다. 또한 가동노즐 아크에서 발생하는 증기의 영향을 받는 그룹의 처음과 끝에 있는 블레이드는 증기가 완전히 채워지지 않아 유량이 교란된다. 이 영향을 블레이드 팬류라고 한다. 이 손실은 교축손실에 비해 사소하다.

교축손실은 제어밸브를 올바르게 조절하면 최소화할 수 있다. 또한 제어밸브 작동순서에 관련된 문제도 교축손실에 영향을 준다.

증기밸브(MSV, IV 등)에 관련된 다른 하나의 손실은 밸브 Stem과 부싱사이의 증기누설이다. 부싱 안에서 Stem이 자유롭게 움직일 수 있도록 Stem과 부싱 사이에는 어느 정도 간격이 있다. 그 결과 발생하는 증기누설을 밸브 Stem 누설이라고 하며, 터빈에 대한 손실의 일부가 된다. 밸브 Stem과 부싱사이에 지정된 간격을 유지하면 밸브 Stem 누설을 최소화할 수 있다.

카. 방사상 실(Spill) 스트립의 영향

터빈에서 증기가 팽창되는 동안 노즐과 블레이드를 통과하는 실제 통로로 증기의 흐름을 유도해야 한다. 대부분의 압력강하는 노즐에서 발생하므로 임펄스 단의 경우 축을 따라 발생하는 증기 누설방지를 위해 다이어프램의 내경에 다수의 래비린스 실이 제공된다. 이들 래비린스 실은 상대적으로 직경이 작으므로 누설이 제한되고 누설유량이 최소화된다. 일반적으로 블레이드 위로 전체 증기가 흐르며 로터 추력을 한 방향으로만 플러스 값으로 유지하기 위해 임펄스 단의 회전 블레이드에는 어느 정도의 압력강하(5~10%)가 이루어진다. 축 방향 실은 블레이드 플랫폼 위에 가공되어 장착되며 슈라우드 실이 설치되어 증기통로 주위로 증기가 누설되는 것을 방지한다.

또한 임펄스 단에 대한 블레이드 휨에 평형 흡이 제공된다. 이들 흡은 다이어프램 패킹 링의 증기누설에 따라 형성되는 압력을 해제하기 위한 것이다. 이 증기압력이 평형 흡을 통해 해제되지 않는 경우 증기가 주증기 유량경로에 포함되어 터빈 단에 교란을 발생시킴으로써

단 효율이 저하된다.

대표적인 임펄스-반응 단에서 압력강하가 회전 블레이드 및 노즐의 다른 부분에 어느 정도 발생한다. 따라서 블레이드 끝 위의 방사상 공간, 노즐 다이어프램 내경과 샤프트 사이의 공간에 실을 설치해 증기누설을 최소화할 필요가 있다. 이들 실 사이의 간격은 효율 관점에서 매우 중요하다. 이들 방사상 및 축 방향 간격은 마모, 진동 또는 기타 원인에 의해 증가하며, 이 경우 증기누설이 증가한다. 즉 터빈 단에 일부 증기를 사용할 수 없으므로 단 및 터빈의 효율이 감소한다.

타. 그랜드 패킹의 영향

그랜드 실은 터빈 축이 하우징을 관통하는 경우 사용된다. 이들 실은 터빈 하우징에서 외부로 연결되는 축을 따라 발생하는 증기누설을 방지한다. 저압터빈의 경우 그랜드 실을 사용하면 저압터빈 배기 후드로 공기가 유입되는 것을 방지할 수 있다. 이 두 가지 조건 모두 터빈 작동에 중요한 요소이며, 터빈 사이클 열소비율에 영향을 미친다. 공기유입은 또한 복수기 성능에 결정적인 영향을 미치며, 응축수/급수/보일러 시스템에 산소부식을 일으킬 수 있다.

고압터빈 그랜드 실에 방사상 간격이 클 경우 증기누설 유출흐름이 과도하게 발생한다. 이 증기는 터빈 안으로 들어가 증기흐름에 교란 작용을 하여 터빈출력이 감소되고 열소비율은 증가한다. 한편, 저압터빈 복수기의 그랜드 실에 방사상 간격이 크게 존재할 경우 증기실 헤더에서 발생하는 밀봉증기의 흐름으로 플러스 압력의 밀봉이 충분하지 않을 수 있다. 이 경우 터빈배기 하우징 안으로 공기가 유입되어 배압이 증가한다. 복수기 내부압력이 높을 경우 터빈출력이 감소할 뿐 아니라 터빈 사이클 열소비율도 증가한다.

참고 문헌

1. ASME Performance Test Code 6 Steam Turbine, 1998
2. Heat Exchange Institute, Inc. Standards for Steam Surface Condensers, 1995. Nine Edition
3. Evaluating and Improving Steam Turbine Performance, K.C.COTTON, 1993
4. 화력 및 복합발전설비 성능시험지침서, 전력연구원, 2007