

증기터빈 1단 Shell 압력측정에 의한 교축유동 고찰

윤인수*, 이재현**, 유호선***, 문승재****, 이태구*****, 허진혁*****

A Study of Steam Turbine Throttle Flow from Measured First Stage Shell Pressure

In-soo Yoon*, Jae-Heon Lee**, Seung-Jae Moon***, Tae-Gu Lee**** and Jin-Huek Hur*****

Key Words : First Stage Shell Pressure(1단 압력), Throttle Flow(교축유동), Turbine Performance(터빈성능)

Abstract

Industrial Steam Turbine first stage shell pressure is related to throttle flow. Theoretically, first stage shell pressure could, therefore, be measured and used as an index of turbine throttle flow. However, accurate flow measurements show that this pressure is not a reliable index of the actual flow. Data analysis of steam turbine subjected to ASME acceptance tests shows that the use of first stage shell pressure as an index of throttle flow produced errors as large as 9.6 %. The mean of the errors was +2.2% with a standard deviation of ±2.8 %. Applications that require an accurate determination of turbine steam flow, such as turbine acceptance testing, should, therefore, not rely on this method. Therefore, First stage shell pressure measurement serves as a valid and economical indicator of turbine throttle flow in cases where a high degree of accuracy in throttle flow measurement is not required but repeatability is desired, such as for boiler control. Generally speaking, Steam turbine first stage shell pressure may also be a very useful monitor of turbine performance when used with certain other turbine measurements.

1. 서론

산업용 증기터빈의 열소비율은 Power Utility의 상업운전 시 이윤을 결정짓는 최대변수 중의 하나로 계약 시 성능 보증을 충족여부는 Test를 통해 입증하고 있다. 일반적으로 이 성능시험의 공정성 및 정확성을 확보하기 위해 ASME PTC-6 Code를 적용하여 성능시험을 수행하지만 실제시험에서는 Code에서 정의된 것과는 다른 여러 변수들이 산재해 있어 정확한 성능측정을 위해서는 계측기 설치위치 선정에서 계측기의 Handling, 교정 등의 여러 가지 준비들이 필요하다. 특히 증기터빈의 증기유동 측정에는 다양한 방법으로 측정되고 있으며 이는 측정의 정밀도와 밀접한 관계가 있다. 또한 준공 후 터빈 인수성능시험을 하기 위하여 유동시험에서 계측기 관련 교정 및 시험은 최초에 증기터빈에 대한 ASME PTC-6 Test Code에서 규정한 방법으로 실시하게 된다. 이 Test Code에서 제시되는 유동노즐을 사용할 경우 ±0.25% 이상의 정확도를 얻을 수 있다.[1] 정확도는 점검침이 설치된 교정된 계측기의 유동 면이 주증기관과 연결된 상태로 측정하게 된다.

터빈 주증기 유량은 터빈 인수성능시험을 위해 제시된 조건들을 적용하지 않아도 되는 대부분의 산업용 설비에서 일반조건으로 채택한다. 이것은 주증기 유량이 다양하고 일반적인 운전기능을 분석하기 위해 사용되기 때문이다. 터빈의 1단 Shell 압력은 일반적으로 이 목적을 달성하기 위해 사용되어왔고 이것을 “교축유동 지수(index of throttle flow)”라고 한다. 1단 shell의 압력에 기반을 둔 교축유동은 기본적인 터빈성능을 입증하는 자료로서 사용되고 있다.[2] 이 논문에서는 터빈 1단 shell 압력을 측정하여 체계화한 교축유동 지수를 이용할 수 있는 타당성과 한계성을 조사하고자 한다.

2. 터빈 단 유동의 특징

터빈은 <그림1~3>에서 보여주는 것처럼 고정노즐과 증기가 유입되는 회전날개로 구성된 한쌍을 단(Stage)라 한다. 일반적으로 고정노즐과 회전날개의 한 단으로 구성되는 터빈 단을 지나는 증기량은 다음 식으로 표현된다.

$$Q = C_p A P_0 \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{g}{RT} \left[\left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{2}{k}} - \left(\frac{P_1}{P_0} \right)^{\frac{k+1}{k}} \right]} \quad (1)$$

* 한국남동발전, yoonis@kosep.co.kr

** 한양대학교, jhlee@hanyang.ac.kr

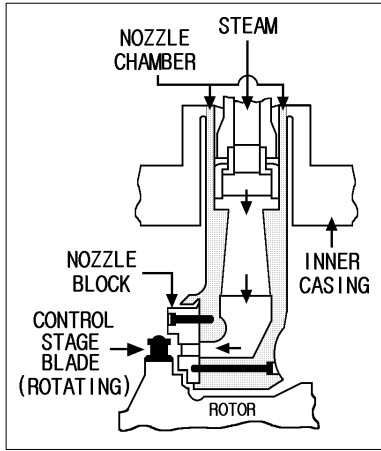
*** 숭실대학교, hsyoo@ssu.ac.kr

**** 한양대학교, smoon@hanyang.ac.kr

***** 한양대학교, mybluetear@hanyang.ac.kr

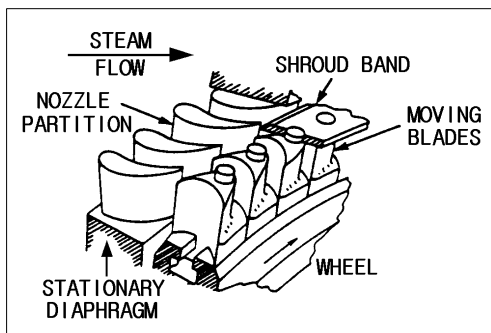
***** 한양대학교, mig20@hanyang.ac.kr

이 방식은 열역학 법칙에서 단열유동과 이상기체 상태방정식에서 유도되는 에너지 방정식으로 터빈 단을 지나는 증기량은 상류 증기압 P_0 에 비례하고, 단을 지나는 상류 증기온도 T_0 의 평방근과 압력비(P_1/P_0)에 반비례함을 나타낸다.[4]



<그림1> Stage Nozzle Block

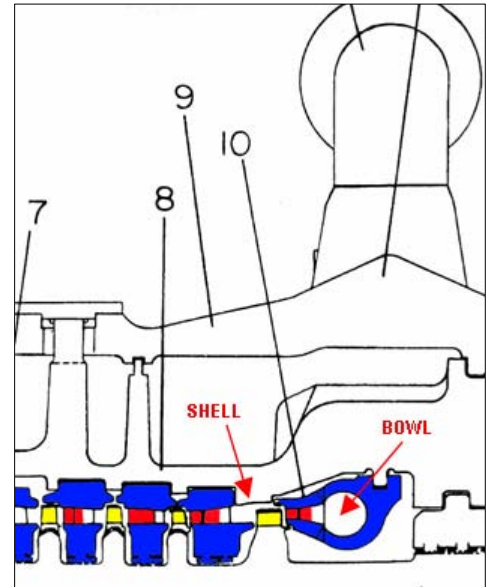
증기터빈의 첫 단과 마지막 단을 제외한 나머지 단을 지나는 증기의 압력비(P_1/P_0)는 정상운전일 경우 터빈부하, 복수기압력, 추기량의 변화에도 불구하고 일정하다. 고압터빈에서 상류 증기 유동의 온도 T_0 는 부하가 감소하면 감소한다. 그렇지만 이 온도 감소는 증기유량이 온도의 평방근의 함수이며 비교적 적은 양이므로 영향을 미치지 않는다. 만일 온도의 영향을 무시한다면, 단을 지나는 증기유량은 P_0 만 비례하게 된다. 이와같은 관계는 <그림4>에서 직선으로 나타난다.[2] 온도변화의 영향이 포함될 때는, 증기량의 설계점과 증기유동이 적은 3%~5%사이의 중간 정도의 크기에서 약간 직선적으로 변화한다. 이것도 <그림4>에 나타내었다. 따라서 <그림4>에서 언급한 1단 shell 압력은 1단 shell 증기량의 특성으로 나타낼 수도 있다. 또한 여기에 임의의 보정치를 고려하여 교축유량 특성으로 나타낼 수도 있다. 여기에 임의의 보정치로 터빈 1단 shell 유동에 따른 조절밸브 손실과 고압터빈 각단과 터빈 1단 shell 손실계산도 구할 수 있다. 일반적으로 운영자의 편리를 위해서 터빈 제작사들은 교축유량 특성으로 나타낸 1단 shell 압력 선도를 제공한다. 이는 이것이 교축유량 지수로서 신뢰성이 있기 때문이다.



<그림2> Typical Steam path diagram for a single 3D stage

위에서 소개한 주어진 단을 지나는 증기의 일정한 압력비 (P_1/P_0)는 임의의 부하에서 임의의 터빈 추기유량이 변동된다면 영향이 미칠 것이다. 따라서 정상운전 중 추기점에서 일정량의 추기량이 변화하면 모든 증기유동의 압력비에 영향을 미칠 것이다. 하지만, 추기점에서 더 멀어지면 추기유동의 변동과 같은 비정상적인 것들에 영향을 적게 받을 것이다.

그리고 단 출구압력 증가는 단에서 입구압력 증가 뿐 아니라 모든 상류방향 압력증가의 원인이 될 것이다. 그렇지만 입구 단의 압력증가는 출구 단 만큼 크지 않다. 대략 10%정도의 출구 단 압력상승은 7%의 입구압 상승으로 나타난다.[5]



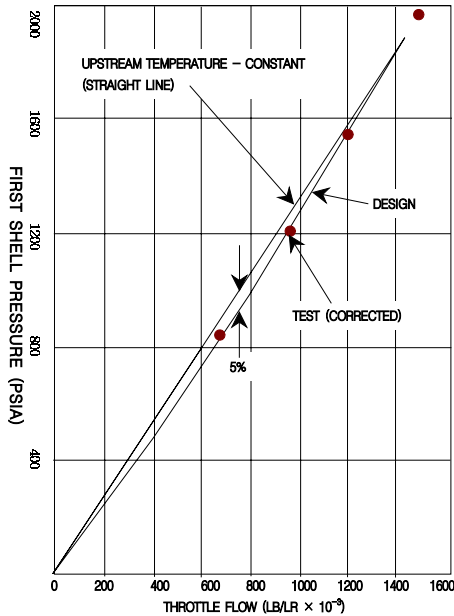
<그림 3> Typical Steam Turbine Shell & Bowl diagram for 500MW(GE)

3. 증기터빈 1단 shell의 압력측정

터빈 단의 shell 압력은 단 출구에 대한 역압으로 정의된다. 1단 shell 압력측정센서 위치는 <그림5>에 나타내었다. 측정센서는 1단 후미의 압력과 동시에 2단 전반부 압력을 측정한다. 터빈 1단 shell 압력으로 측정된 유량은 2단에서의 터빈유량이다. 터빈 1단 shell의 압력과 유량의 관계는 연속되는 단의 상태, 날개의 퇴적물과 밀봉 간극에 따른 누설을 포함한 2단에서의 기계적인 상태와 2단의 상류 증기조건에 따른다. 따라서 터빈 1단 shell의 압력과 유량의 관계는 1단의 상태에 영향을 받지 않는다. 앞에서 언급한 교축유동량 지수로 터빈 shell 1단 압력을 사용하는 것의 따르는 잇점은,

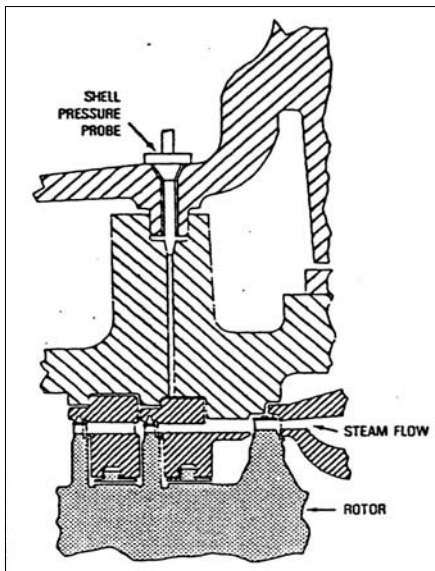
1. 터빈 1단 shell 압력은 측정이 간편하고 실질적인 손실이 없다.
 2. 터빈의 기계적 상태와 연관되어 반복적으로 측정해도 정확도는 나빠지지 않는다. 주기적으로 측정된 측정치의 정확도 면에서 이 측정법을 사용한 신뢰성은 높다. 특히 이 유량센서는 한번 설치되면 자주 점검할 필요가 없다.
 3. 대부분의 유량측정은 차압식을 사용한다. 실질적인 손실은 대부분 압력손실에 기인한다. 그렇지만 터빈 1단 shell 압력측정에서는 이 압력손실이 발생되지 않는다.
 4. 터빈 1단 shell 압력은 일정한 주기운전에서 비교적 일정하다. 다만 고압터빈의 화력발전에서 그 예로 볼 수 있다. 만일 재열기에서 일정한 고온으로 가열이 안되면 재열기 압력은 5% 정도 변화된다. 그렇지만 터빈 1단 shell 압력은 대략 0.5%정도 변화된다. 터빈 1단 shell 압력에 대한 영향은 최고 압력이나 온도점이 급수가열기에 공급하는 추기가 터빈 중간 고압 단에서 정해진다는 점이다. 급수가열기를 제거하면 이전에 언급된 추기량에서 비정상 상태로의 변화가 되는 예로 볼 수 있다.
- 그리고 다양한 측정법이 터빈 1단 shell 압력을 측정하기 위해 사용된다. 자중계(dead-weight gauge)가 가장 정확한 계측기

라고 할 수 있다. 그렇지만 사용이 불편하다고 할 수 있다.



<그림 4> Relation of throttle flow to first stage shell pressure

정확성만 따질 때는 변환기(transducer)가 유용하지만 주기적으로 교정과 보수를 해야 한다. 이 같은 계측기들에서 대략 0.1% 정도의 오차가 발생하며 오차에 의하여 계측기 전체의 오차값에 영향을 미치지 않도록 주의해야 한다. 이렇게 해서 측정된 압력은 교측온도 설계를 위하여 재 교정되고 교측 유동량을 고려해야 하는 제작자들에게 자료로 주어져 압력-유동 선도를 만드는 데 이용된다.[3]



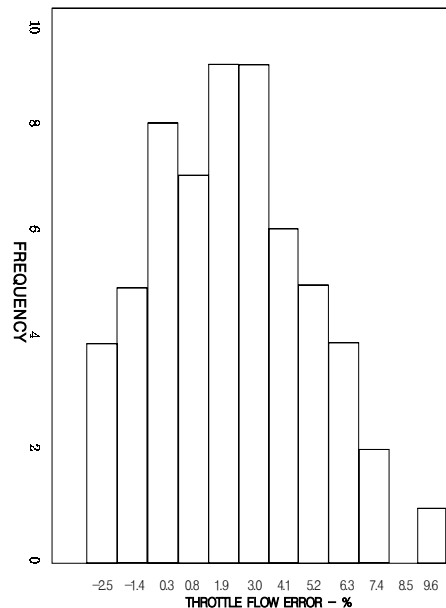
<그림5> Shell pressure probe location

화력발전 설비는 터빈 1단 shell 압력을 보일러 연소 조정을 위한 교측유동량 지수로 사용한다. 이와 유사하게 경수로를 사용하는 원자력에서는 임의의 반응로 조정을 위해 이 압력을 이용한다. 이 방법은 관례적으로 정확도보다 측정의 반복성에서 더 효과적이다. 다른 계측기들과의 통합하여 터빈 1단 shell 압력 변동에 대한 자료는 터빈 성능저하를 판단하는 데 유용하게 사용된다. 이를 적용하기 위해 data의 정확성이 한 주기에 필요한

교정을 최소화하고 서로 동일한 운전상태에서 주기적으로 수집되어야 한다. 터빈 1단 shell과 다른 주요한 압력은 동일한 정밀도의 자중계(dead-weight gauge)와 변환기(transducer) 정밀도 0.1%급으로 측정되어야 한다. 임의의 서로 다른 한 주기운전의 변화는 이같이 측정되어야 한다. 이들 측정내용과 정밀도는 연관된 다양한 방면에서 성능측정에 관한 논의를 하여야 한다.

터빈 1단 shell 압력은 터빈 인수성능 시험과 같이 절대적인 성능시험의 등급이 요구되는 곳에서는 사용되지 않아야 한다. 터빈 1단 shell 압력에서 발생하는 교측유량은 아래와 같은 오차가 있다.

노즐과 회전날개 면과 같이 설계변수에서 약간의 편차는 단을 통하여 압력비에 영향을 미치고 결과적으로 압력-유동관계가 된다. 게다가 제작사는 실제적인 노즐 출구계수를 정확하게 예측하지 못한다. 이같은 이유로 오차의 크기는 설계-유동 관계와 터빈 1단 shell 압력측정을 고려한 유량에서 ASME Code 시험으로 비교하여 나타내는 것이 가장 좋다.



<그림 6> Histogram of throttle flow errors

ASME Code 시험의 결과는 <그림6>에 나타내었다. 이 그래프는 교측유동 오차의 빈번한 분포가 57개 터빈의 ASME Code 시험에서 얻어진 것이다.[3] 이것은 21개 터빈의 data로 이미 발표된 자료이다. 이 도표에 나타난 시험은 약 25년간 수행된 것이다. 각각의 터빈은 기동 후 2~3개월 동안 측정되었다. 교측유동량 오차는 유량측정과 후류의 %로서 표현되고, 설계는 교측온도를 교정하며, 설계-유동 관계로부터 얻어지는 차이로 오차가 정의된다.

실험에 사용된 57개 터빈에 대하여 오차의 평균은 +2.2%에서 표준편차 ±2.8%이다. 이는 터빈 1단 shell 압력의 교측유동 손실이 1단 shell 압력을 사용한 교측유량 오차가 -0.6%에서 +5.0% 사이에 있을 것이라는 가능성이 약 68% 정도가 된다. <그림6>는 또한 한 가지 경우에 9.6%만큼의 손실이 기록되었다는 것을 볼 수 있다. 이 터빈시험 자료는 기계적인 오차가 발생됨을 나타낸다. 다시말해 터빈 1단 shell 압력에서의 교측 유동량은 실제값 보다 적다. 이같이 예상된 유동계수의 변형은 압력-유동 선도를 작성할 때 제작사들이 주로 사용한다. 대부분의 제작사들은 이같은 경우에 측정된 단을 지나는 유량보다 더 많은 양을 잡는다.

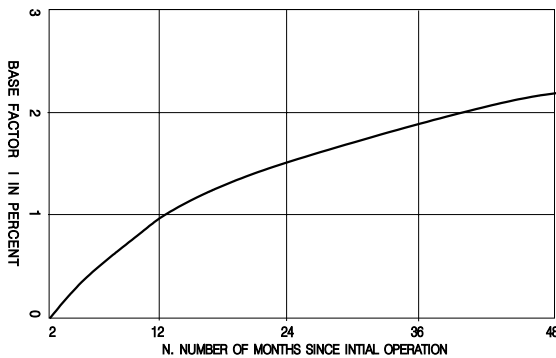
4. 열화, 퇴적, 마모에 의한 터빈 성능저하

터빈 상태는 열화, 날개표면 퇴적물 증가, 마모에 의한 단 사이의 밀봉불량 등에 따라 성능이 변화된다.[5]

터빈의 열화는 터빈의 기동정지 중에 고온 고압에 의한 열응력 등에 의해 나타난다. 일반적으로 열응력에 영향을 미치는 대표적인 요소로는 온도변화률과 변화폭, 표면 열전달계수, 금속두께 및 직경, 금속 열적특성, 고응력(High Stress) 영역에서 열응력 누적 등이 있다. 터빈에서 성능과 관련된 열응력은 ASME Code PTC-6에서 터빈 성능평가에 대한 기준을 제시하고 있다. 이 Code에서 고려 대상은 터빈의 열화와 성능의 관계이다. 일반적으로 아래와 같은 식을 사용하여 화력발전소에 대한 재열 및 비재열 터빈의 열화에 기인한 열소비율(Heat rate) 증가를 표현한다.

$$D = \frac{f}{\log_{10}(MW)} \sqrt{\frac{P_1}{2400}} \quad (2)$$

여기서, f 는 <그림7>에 나타내었다. <그림7>는 적절한 수처리와 최적의 운전이력을 가진 설비에 대한 열화추정선도 이다.[3]



<그림7> The effect of aging on heat rate for fossil fuel fired units

보일러로부터의 Carry Over는 터빈 증기통로에 퇴적을 일으키며 이것은 터빈의 효율, 용량 및 신뢰성에 상당한 영향을 미친다. 날개표면의 퇴적물 두께와 위치에 따라서도 퇴적에 의한 증기 유동단 효율에 영향을 미친다. 퇴적물의 두께는 저압 터빈 날개단 보다 고압터빈 날개단에서 더 많은 영향을 미친다. 그래서, 고압 1단 노즐표면 퇴적물의 영향은 1단 유로면적을 비례적으로 감소시켜 마지막 저압단 날개표면에 부착되는 퇴적물보다 더 많이 흐름을 저해한다. 일반적으로 터빈날개의 퇴적물은 고압단이 저압단 보다 더 크게 압력이 변화된다. 터빈 유동량의 감소나 터빈 1단 shell 압력의 증가는 평균보다 효율을 감소시킨다. 많은 연구물들에서 퇴적물에 의한 고압단 터빈 유동량 감소와 1단 shell 압력의 증가는 효율감소와 비례한다는 것이 밝혀졌다. 결론적으로 고압단에서 퇴적물에 의한 날개무게가 1% 증가하면 터빈 효율이 약 0.5% 감소한다는 것을 알아내었다. 또한 퇴적물은 노즐부위의 면적을 감소시키고 단 압력을 증가시킨다. 특히 퇴적물에 의하여 첫 번째 단의 노즐면적이 10% 감소될 때 터빈의 출력은 3%가 감소하며 두 번째 단에서는 2.2%가 감소되는 것을 알 수 있다. 앞서 소개했듯이 터빈 1단 shell 압력으로 얻을 수 있는 교축유동량은 터빈 열화로 인해서 실제값보다 더 크다고 볼 수 있다.[4]

고정부와 회전부의 러빙(Rubbing)은 간극(Clearance)을 증가시키며 이것은 증기누설을 증가시키게 된다. 이들 단과 단사이

의 증기누설도 효율저하의 원인이다. 설계치보다 단의 Packing의 간극이 1% 증가하면 단 효율이 1% 감소하고, 단 누설이 1% 증가하면 전체 단에서는 누설량이 2% 증가한다. 그러므로, 터빈 1단 shell 압력으로 계산되는 교축유동량은 단 사이의 간극증가에 의하여 실제값보다 낮아진다. <표1>은 단의 간극 증가에 따른 열소비율 증가를 나타낸 것이다. 터빈 1단 shell 압력에 의한 교축유동량 오차는 날개표면의 퇴적물과 단 사이의 누설증가, 그리고 구조적인 오차에 기인한다. 터빈날개 표면의 퇴적물은 운전자의 수처리 불량에 주 원인으로 볼 수 있다. 단 사이의 Packing 불량에 의한 누설은 Packing과 Spill Strip의 러빙은 로터진동, 고정부의 열적변형, 베어링 진동, Water Induction, SPE 등과 급격한 부하변동의 의한 주파수 변화, 잦은 기동정지 등의 미숙한 운전이 기인된다.[6]

앞에서 논의한 날개표면의 퇴적현상과 각 단 사이의 누설 증가 등이 교축유동량 측정의 주 장애요인이 된다. 이들 두가지 요인을 최대한 제거하도록 해야 한다. 이로서, 대부분의 터빈 성능시험에서 나타난 교축유동의 +2.2%의 구조적인 오차는 터빈 1단 shell 압력을 측정함으로써 얻을 수 있다.

<표1> 간극 10 mils 증가에 따른 영향

구 분	출 력	열소비율
Radial Tip Spill Strip	875 kW 감소	12.6 BTU/kW 증가
Diaphragm Packing	490 kW 감소	9.3 BTU/kW 증가
Shaft Packing	494 kW 감소	10 BTU/kW 증가

5. 결론

1. 터빈 1단 shell 압력은 정확한 교축유동 지수로서 신뢰도가 떨어지고 터빈 인수성능 시험과 같은 절대적인 성능을 측정하는 경우에 적용이 되지 않는다.

2. 터빈 1단 shell 압력은 교축유동에서 단기간의 변화상태를 나타내는 데는 유효하지만 유동의 정밀한 특성을 나타내지는 못한다. 그러나 일반적인 터빈성능이나 다른 계측기와 조합으로 설비운전을 하기 위한 기초 자료로서는 유용하다.

3. 터빈 1단 shell 압력은 터빈의 기계적인 상태에 따라 영향을 받는다. 따라서 1단 shell 압력의 유효성은 얼마나 정확한 운전을 하는가, 기동정지 때의 열응력 등의 영향을 최소화 하느냐에 달려 있다.

참고문헌

- [1] ASME Performance Test Code-6, (1996)
- [2] KC Cootton, B. Bornstein "Determining Turbine Throttle Flow from Measured First Stage Shell Pressure-A Critical Assessment", Power Plant Engineering,(2006)
- [3] ANSI/ASME PTC-6 Report : guidance for Evaluation of Measurement Uncertainty in Performance Tests of Steam Turbines, Scheduled for Publication in (1982)
- [4] 한국전력기술, 증기터빈 성능이론, (2000)
- [5] 한국발전교육원, 터빈운전실무, (2007)
- [6] 한전화력연수원, 화력발전이론 I, (1998)
- [7] 한국남동발전, 영흥화력 인수성능시험 보고서, (2005)