

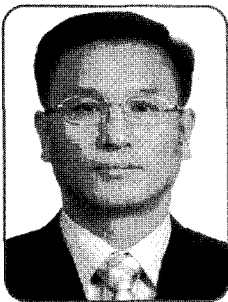
LM6000 MAJOR COMPONENTS  
LM6000 HOOFDONDERDELEN

## 7. 결론

LM 가스터빈은 기존 발전용 가스터빈보다 중량당 비출력이 크고, 효율이 높다. 이러한 특성 때문에 발전용 뿐 아니라 선박 및 함정용 추진 엔진으로도 많이 사용된다. 국내에는 비교적 생소한 모델이지만 오래전부터 미국, 유럽, 중동지역에서 열병합 발전용 터빈으로

널리 이용되고 있다. 앞서 언급한 것처럼 LM 가스터빈 13~50MW의 비교적 소형 출력이기 때문에 소규모 열병합 단지에 적용될 수 있을 것으로 보인다. 현재 국내에서는 해군함정에 LM1600 가스터빈이 추진기 엔진으로 탑재되어 있는 것으로 알려져 있다.

# 증기터빈 성능시험 및 성능분석 기법(1)



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

## 1. 증기터빈 성능분석에 필요한 자료

증기터빈의 성능분석에 필요한 기초적인 자료로는 ① 급수유량, ② 첫 단 압력, ③ 모든 추기의 압력과 온도, ④ 주증기압력과 온도, ⑤ 재열증기온도, ⑥ 재열증기관의 압력강하율, ⑦ 저압터빈출구 배기압력, ⑧ 고압터빈

출구 증기의 압력과 온도, ⑨ 고압/중압/저압 터빈의 엔탈피강하효율 등이다.

## 2. 자료 수집을 위한 성능시험조건

일관성 있는 자료를 얻기 위해서는 정격 증기조건과 동일한 제어밸브개도 하에서 실시하여야 한다. 따라서 밸브 점에서 실시하는 것이 가장 바람직하다.

[주] 밸브 점 : 해당 제어밸브가 거의 열리고 다음 밸브가 열리기 시작하는 점으로 엔탈피 강하효율이 최고가 되는 밸브위치를 말함.

## 3. 시험자료에 의한 성능분석

### 가. 터빈 시험결과의 해석

시험결과 분석의 중요한 첫 번째 단계는 시험자료를

확인하는 것이다. 이 단계는 주관적이고 경험에 따라 결정되는 경우가 많지만 일반화한 후 적용할 수 있는 항목은 다음과 같다.

- 1) 정상운전 및 시험조건의 터빈 열효율은 시간이 지남에 따라 감소한다.
- 2) 발전기 출력, 첫 단 압력 및 보정 교축유량의 편차는 동일한 경향을 나타낸다. 그 이유는 출력은 첫 단 압력으로 표시되는 유량에 따라 결정되기 때문이다. 이들 매개변수는 모두 동시에 증가하거나 감소된다.
- 3) VWO 시험의 경우 첫 단 압력의 강하에 의해 고압터빈효율이 낮게 나온다면 제어밸브가 모두 완전히 열리지 않았음을 의미할 수 있다.
- 4) 중압터빈효율은 일반적으로 부하변동에 관계없이 일정하다. 혹 변화가 있을 경우라도 그 폭은 성능 시험 정밀도보다 적다.
- 5) 어떤 이유이건 시험이 유효하지 않다고 판단될 경우 시험을 다시 해야 한다.
- 6) 간과하기 쉬운 문제는 시험 결과의 불확도이다. 시험 불확도 때문에 성능의 변화가 발생하는 경우가 많다. 엄격한 불확도 분석에는 많은 시간이 필요하다. 단, 계산된 결과에 대한 계측기 정밀도 영향을 파악하는 것이 매우 유리하다. 그러한 민감도 분석을 통해 성능시험의 재현성과 편차의 범위를 파악할 수 있다. 또한 가장 영향이 큰 측정에 특별히 관심을 기울일 수 있다. 불확도는 개별 계측기 불확도의 제곱의 합에 대한 제곱근으로 정의된다.

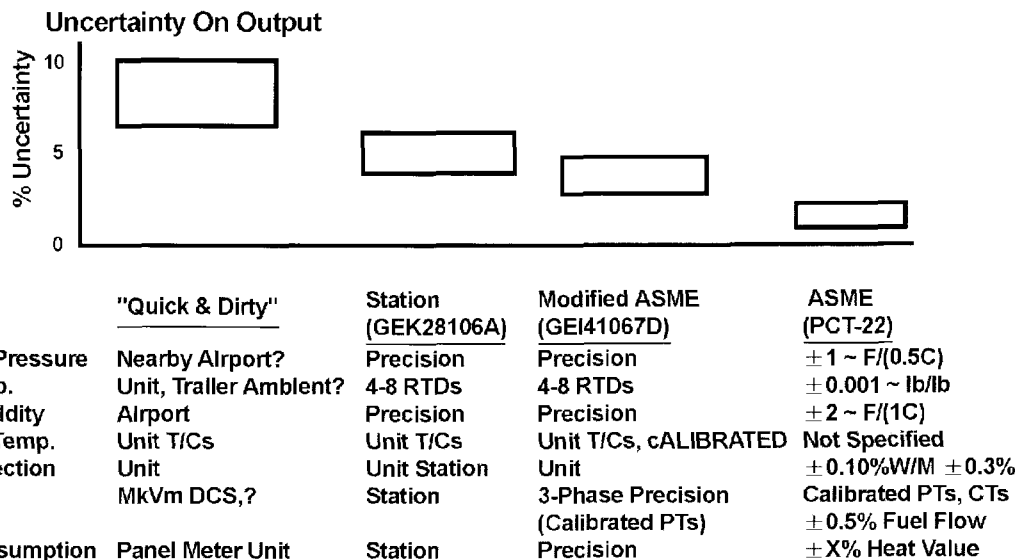
## 나. 급수유량

부하에 직선적으로 변하는 특성을 가지고 있다. 주어진 부하에서 급수유량이 증가시에는 터빈에 문제점이 있음을 시사하는 것으로서 이의 원인으로는 ① 엔탈피 강하효율의 저하, ② 터빈의 그랜드패킹과 내부 실의 마모, ③ 증기유로의 침식, ④ 노즐과 블레이드에 침전물 퇴적, ⑤ 배기압력의 악화, ⑥ 급수가열기의 성능저하, ⑦ 격리밸브들의 누설, ⑧ 보조증기 사용량 증가, ⑨ 계측오차 등이 있다.

## 다. 첫 단 압력

### 1) 첫 단 압력의 특성

첫 단 압력이란 1단 하류측 및/또는 제2단 상류측 압력으로 제2단 입구압력을 의미하며 부하에 거의 직선적으로 변한다(유량에 직접 비례). 따라서 일반적으로 제어 및/또는 지시용 주증기량은 첫 단 압력을 이용하여 계산한다. 이는 첫 단 압력은 측정이 용이하고 측정시스템의 유지보수가 간단하며 재현성과 반복성이 양호하기 때문이다. 그러나 첫 단의 압력/유량 관계는 정확한 직선이 아니다. 왜냐하면 저부하시 터빈에서 이루어진 총 일량의 대부분은 1단에서 이루어지므로 2단에 유입되는 증기온도와 압력은 정격부하시 보다 낮아지기 때문이다. 증기온도가 낮아짐에 의해 온도가 일정할 때보다 저부하시 적어진 유량을 통과시키기 위하여 보다 낮은 압력이 되어야 한다. 이와 같은 경향은 고압터빈의 모든 단락에 있어서 연속되며 터빈의 후속 단락유량에 대해 3~5 % 감소하는 편차를 갖는다. 재열 이후의 모든 터



[그림 1] 성능시험 불확도 수준 비교도

빈 단락은 터빈의 최종단락을 제외하고는 직선의 압력-유량관계를 갖는다.

### 2) 첫 단 압력비(첫 단 압력/주증기압력)가 증가된 경우

가) 첫 단 하류측 압력 증가가 수반될 때 : 노즐블록의 침식에 의한 주증기량 증가가 원인이며, 터빈 출력의 증가가 수반된다.

나) 하류측 압력이 증가되지 않을 때 : 첫 단 하류측의 버킷 손상이나 오염에 의한 증기통로의 유로 단면적 감소가 원인이다.

### 3) 첫 단 압력비가 감소된 경우

가) 고압터빈 하류측 내부 실의 과도한 간극

나) 노즐블록이나 증기 입구부의 흐름제한

① 첫 단 날개의 손상(증기유로를 일부 막히게 하여 터빈에 흐르는 유량을 감소시킴)

② 제어밸브, Governing 계통의 손상이나 조정 불량

- 제어밸브 부품(Stem) 절손으로 동작되지 않는 경우

- 분해점검 후 재조립이 불량하거나 또는 Control Gear의 조정이 불량하여 제어밸브가 적절한 순서와 올바른 양정으로 운전되지 않는 경우

③ 침전물 축적으로 인한 증기유로면적 감소

다) 고압 및 중압터빈이 한 케이싱 내에 결합된 경우, 증기 입구부(Steam Inlet Pipe, Nozzle Chamber)로부터 터빈 저압부로의 과도한 누설

## 라. 터빈 단락압력

부하에 직선적으로 변하며 폐쇄된 상류측 압력은 증가되고, 하류측 압력은 감소한다. 첫 단 압력비가 일정한 가운데 해당 단의 압력비(하류측 압력/첫 단 압력)가 증가된 경우는 측정된 압력 하류측 증기통로의 흐름제한이 원인이며, 압력비가 감소된 경우는 측정된 압력 하류측 증기통로의 유로면적 증가가 원인이다.

## 마. 증기온도

일정한 제어밸브개도 하에서 급수가열기 추기유량이 일정하다면 재열증기온도와 하류측 추기와와의 온도차가 일정하여야 하는데, 만약 온도차가 감소한다면 증기통로 상태가 악화되었음을 의미하는 것으로서 온도차감소가 추기압력증가와 함께 일어났다면 추기점 하류에서

성능저하가 발생된 것이고, 추기압력이 일정한 가운데 온도차가 감소하였다면 재열기와 추기점 사이에서 성능저하가 발생된 것이다.

## 바. 엔탈피강하효율

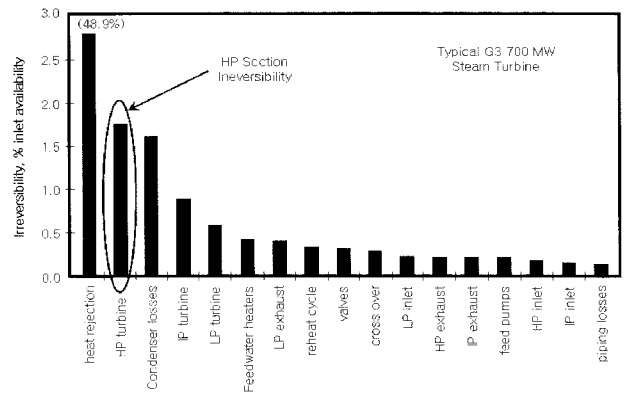
### 1) 요약

정격부하에서보다 부분부하에서 고압터빈효율이 크게 저하하여 고압터빈 효율곡선 기울기가 기준치에 비해 변화가 발생되었다면 이것은 터빈 첫 단의 성능이 저하되고 있음을 시사한다. 터빈 전체 엔탈피강하효율이 저하되었다면 이는 패킹손상의 증가, 블레이드의 침전물퇴적 또는 블레이드손상 때문이다. 중압터빈효율이 상승된 것처럼 계산되었다면 이는 아마도 N2 패킹의 누설증가 때문일 것이다.

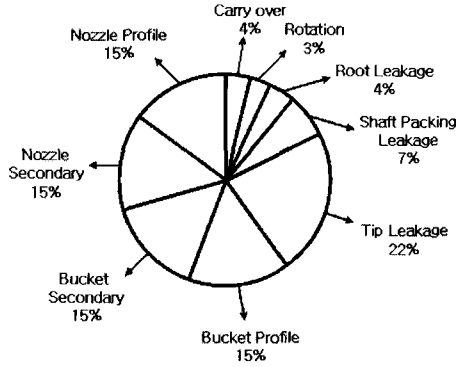
### 2) 고압터빈 엔탈피강하효율

고압터빈효율은 제어밸브개도와 비교하면 가장 잘 표현할 수 있다. 설계효율과의 편차가 클 경우 고형입자 침식에 의한 첫 단의 효율이 감소한 것이다. 블레이드의 침전물 부착과 실 간극의 증가에 의해서도 효율이 저하된다. 이 두 가지 손상 모두 효율은 서서히 감소된다. 점진적인 감소는 주요 분해정비 후 수 년에 걸쳐 발생할 수 있다. 효율이 급격하게 감소되는 것은 기계적 손상이 발생된 것이다. 실의 마모가 의심되는 경우 각 밸브점에서 시험하여 시험결과를 교축유속과 설계효율을 비교해 표시한다. 표시된 시험점이 설계치와는 달리 비정상적인 곡선일 경우 누설임을 파악할 수 있다. 고압터빈효율의 대표적인 감소는 다음 표와 같다.

손상 원인	효율 손실 (%)
고형입자 침식	0 ~ 2 %
블레이드에 침전물 부착	0 ~ 10 %
기계적 손상	0 ~ 3 %
실 마모	2 ~ 12 %



[그림 2] 증기터빈의 열손실 분포도



[그림 3] 고압터빈의 열손실 분포도

### 3) 중압터빈 엔탈피강하효율

중압터빈의 모든 단은 일정한 압력비로 작동되기 때문에 효율은 모든 부하에서 일정하게 유지된다. 고형입자 침식이나 블레이드의 침전물 퇴적 때문에 증기유료가 변경되는 경우에도 그러하다. 온도변화방법을 사용한 N2 패킹 누설시험의 결과는 높은 부하와 낮은 부하에서 유사해야 한다. 온도 불일치가 가장 큰, 따라서 슬로프 차이가 가장 큰 두 곡선의 교차점을 실제 N2 패킹 누설 및 효율로 파악해야 한다. 분해정비 후 몇 년 동안 효율이 서서히 감소할 수 있다. 여러 번 기동, 정지를 하는 경우, 재열기 박리편이 고형입자 침식의 원인일 수 있다. 대부분의 손상 메커니즘(침전물, 기계적 손상 및 마모 실)의 경우, 중압터빈 유량 영역이 더 크므로 고압터빈보다 중압터빈 성능에 대한 영향이 적다. 중압터빈의 성능이 급격하게 감소하는 것은 기계적 손상이 발생한 것이다. 위에 설명한 원인에 따른 대표적인 중압터빈 효율 손실은 다음 표와 같다.

표. 대표적인 중압터빈효율 손실	
고형입자 침식	0 ~ 2 %
블레이드에 침전물 부착	0 ~ 5 %
기계적 손상	0 ~ 2 %
실 마모	1 ~ 4 %

\* 계산된 중압터빈효율에 대한 N2 누설의 영향

N2 패킹을 따라 고압터빈에서 중압터빈 Bowl로 가는 누설증기는 계산된 중압터빈효율에만 영향을 줄뿐 실제 중압터빈효율에는 어떤 영향도 없다. 중압터빈 Bowl에 N2 누설증기가 들어오면 중압터빈 단으로 들어오는 증기의 엔탈피가 낮아진다. 중압터빈 bowl의 질량과 에너지수지에 따라 중압터빈 Bowl 엔탈피에 대해 다음과 같은 관계가 성립된다.

$$H_{IP\text{Bowl}} = (HHRS + \frac{\%N_2}{100} \times H_{N_2}) / (1 + \frac{\%N_2}{100})$$

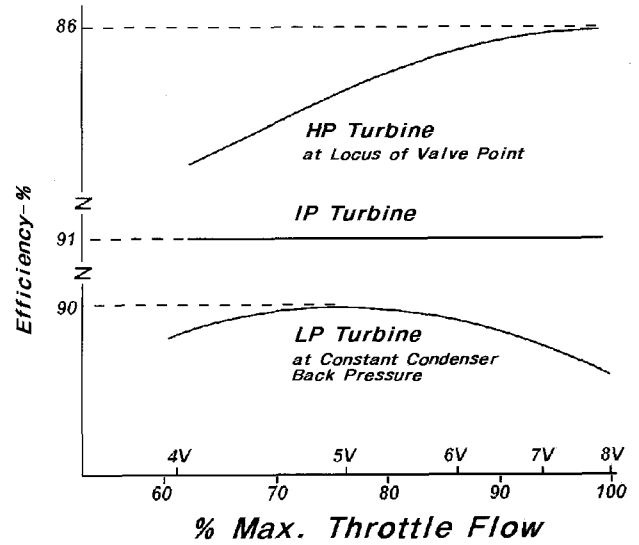
$H_{IP\text{Bowl}}$  = 중압터빈 Bowl 증기 엔탈피,

HHRS = 중압터빈입구 증기 엔탈피

$\%N_2$  = 재열유량의 N2 누설유량 백분율,

$H_{N_2}$  = N2 누설증기 엔탈피

N2 누설증기의 엔탈피는 열평형에서 추정할 수 있다. N2 누설증기의 엔탈피를 결정하려면 실제 및 설계 교축 엔탈피와의 차이를 기준 N2 누설증기의 엔탈피에 추가해야 한다. N2 엔탈피를 직접 추정하는 다른 하나의 방법은 고압터빈 팽창선을 물리에 선도에 그려 1단 압력의 엔탈피를 읽는 것이다. 성능시험결과는 N2 누설증기의 엔탈피와 무관하므로 어떤 방법을 사용해도 무방하다.



[그림 4] 부하별 엔탈피강하효율 특성곡선

### 4) 저압터빈 엔탈피강하효율

저압터빈의 배기는 포화증기이므로 엔탈피(UEEP or ELEP)의 산정이 매우 까다롭다. 저압터빈효율을 직접 측정하기 위한 신기술이 개발 중이지만 아직 연구 개발 단계에 머무르고 있다. 다행히 고형자 침식, 침전물 퇴적 및 실 마모와 같은 손상 메커니즘에 있어 저압터빈성능은 고압터빈이나 중압터빈보다는 영향을 덜 받는다. 대표적인 저압터빈효율 감소는 다음 표와 같다.

표. 대표적인 저압터빈효율 손실	
고형입자 침식	0 ~ 0.5 %
블레이드에 침전물 부착	0 ~ 3 %
기계적 손상	0 ~ 1 %
실 마모	0 ~ 1 %

### 사. 최대 발전가능 전기출력 점검

보정된 전기출력은 사이클 성능의 변화가 고려되지만 증기유료조건 변화에 의한 전기출력 감소문제는 해결할 수 없다. VWO 전기출력 점검을 수행하면 보정용량과 설계용량의 차이를 엔탈피강하효율, 유량통과용량과 같은 확인된 설비 성능저하의 원인으로 파악할 수 있다. 급수가열 사이클이 정상적으로 작동하고 있는 경우의 나머지 불분명 전기출력 감소원인은 주로 미확인 저압 터빈성능, 패킹 누설유량, 일차유량 측정오류일 수 있으며, 이들 세 가지 원인이 모두 포함될 가능성이 많다. 유류발전설비의 공기예열과 보일러 급수펌프터빈 구동을 위한 증기유량이 많을 경우에도 전기출력의 감소요인이 된다.

#### 아. 유량통과용량 점검

터빈의 유량통과용량은 첫 단 노즐면적의 함수이다. 노즐이 심각하게 침식될 경우 유량통과용량이 10 %까지 증가될 수 있으며, 이 경우 전기출력이 증가한다. 따라서 첫 단 압력과 주증기탕과의 관계곡선이 바뀌게 된다. 침식이 발생되면 일정한 제어밸브개도 하에서 첫 단의 압력은 높게 나타난다. 반대로 침전물이 부착될 경우에는 유량통과용량은 적어지고 일정한 제어밸브개도 하에서의 첫 단의 압력은 낮아진다.

교축유량감소의 다른 잠재적 원인에는 제어밸브의 부

정확한 조정 및 밸브 구성부품의 고장이 포함된다. 정비 전, 후의 성능시험은 터빈조립이 제대로 수행되었는지, 증기유료에 장애물이 있는지 여부를 확인할 수 있는 중요한 방법이다. VWO 전기출력 점검결과로도 보정 교축유량이 표시하는 유량용량의 변화를 확인할 수 없는 경우는 급수유량 측정이 잘못된 것일 수 있다. 이럴 경우에는 교축기구의 유량차압 측정설비(사용된 계측기 교정 포함)의 건전성을 검증해야 한다.

### 4. 시험자료 분석지침

〈표 1〉, 〈표 2〉, 〈표 3〉

### 5. Rules of Thumb on Steam Turbine for Fossil Power Plant

(from Evaluating and Improving Steam Turbine Performance by K.C. Cotton)

- ① 고압터빈 엔탈피강하효율 1 % 변화 : 0.16 % 열 소비율, 0.30 % 출력 변화
- ② 중압터빈 엔탈피강하효율 1 % 변화 : 0.12 % 열 소비율, 0.12 % 출력 변화
- ③ 저압터빈 엔탈피강하효율 1 % 변화 : 0.50 % 열 소비율, 0.50 % 출력 변화
- ④ 주증기탕 1 % 증가 : 출력 0.94 % 증가

〈표 1〉 시험자료 분석지침

항 목	발생기간	주증기탕	단락효율	전기출력
고형 미립자 침식 (SPE : Solid Particle Erosion)	점진적	증가	감소 (SPE :영향 없음, 저부하시 HP 효율 크게 감소)	증가
침전물 (Deposit)	점진적	감소 (정지 후 증가할 수도 있음)	감소	감소
이물질 (Wrench, Bolt 등)	정지작업 후 돌발적	감소	감소	감소
Peening (용접 부스리기 등)	보일러 정비 후 돌발적	감소	감소	감소
기계적 파손	운전중 돌발적	보통 감소	감소	감소
Water Induction	운전중 돌발적	약간증가	감소	감소
진동	돌발적, 첫 기동시 가장 심함	약간증가	감소	감소
Steam Whirl	첫 기동시 돌발적	약간증가	감소	감소
내부 누설 (Balance Hole Plug)	정비 후 돌발적	증가	고압터빈 감소	감소
내부 누설 (Inner Shell)	점진적	증가	감소	약간 감소
밸브 Stem 절단	돌발적	감소	감소	감소

<표 2> Effect of Cycle Conditions on the Turbine Performance\_Fossil

Items	Closing Control 밸브s Starting from VWO	Decrease in Throttle Pressure	Decrease in Throttle Temp	Increase in Condenser Pressure	Top Heater Out of Service	Increase in Hot Reheat Temp
$\eta_{HP}$	↓	-	-	-	-	-
PCRH	↓	↓	↑	-	↑	↑
RH $\Delta P\%$	-	-	-	-	↑	↓
IP Turbine Volume Flow	↓	-	-	-	-	-
PHRH / PLP	-	-	-	-	-	-
$\eta_{IP}$	-	-	-	-	-	↑
Total Exhaust Loss(TEL)	↓	↑	↑	↑	↑	-
$\eta_{LP}$ UEEP	↑	↑	↓	↓	↑	-
PLP / PExh	↓	↓	↑	↓	↑	↑
Throttle Flow	↓	↓	↑	↑	↑	↓
Power	↓	↓	↑	↓	↑	↑
Heat Rate	↑	↑	↑	↑	↑	↓
Final Feed Water Temp	↓	↓	-	↑	↓	↓

<표 3> Effect of Changes in Turbine Condition on Cycle Parameters\_Fossil

Condition	Throttle Flow	PT	P1st	PHRH	PLP	HP Eff.	IP Eff.
Increase $T_t$	↓	N.C.	-	↓	↓	↑	-
Increase $T_{HRH}$	-	N.C.	-	↑	↑	-	↑
Increase $A_{1st}$ (SPE) HP Turbine	↑	N.C.	↑	↑	↑	↓	-
Increase $A_{HRH}$ (SPE) IP Turbine	-	N.C.	-	↓	-	-	↓
Decrease $A_{1st}$ (Deposits and Peening) HP Turbine	↓	N.C.	↓	↓	↓	↓	-
Decrease $A_{HRH}$ (Deposits and Peening) IP Turbine	-	N.C.	-	↑	-	-	↓
Decrease $A_{2nd}$ (Deposits) HP Turbine	↓	N.C.	↑	↓	↓	↓	-
Increase $A_{2nd}$ (Rubs) HP Turbine	↑	N.C.	↓	↑	↑	↓	-
Decrease ALP (Deposits and Damage)	-	N.C.	-	-	-	-	-
Increase $A_{2nd}$ (Balance Plug and Inner Shell Leakage) HP Turbine	-	N.C.	-	-	-	-	-

T : Temperature, P : Pressure, A : Area  
 첨자 T : Throttle, 1st : First Stage, 2nd : Second Stage

- ⑤ 최종급수온도 1 °C 증가 : 전기출력 0.15 % 감소, 열소비율 0.049 % 향상
- ⑥ 배기손실 1 kcal 변화 : 0.4 % 열소비율 변화
- ⑦ 주증기온도 10 °C 감소 : 고압터빈 엔탈피강하효율 0.21 % 감소
- ⑧ 단락에서 압력/유량관계의 비가 5 % 증가는 Alarm 상태의 원인이 됨
- ⑨ 증기유로의 1 % 차압증가는 열소비율 0.1 % 증가
- ⑩ 1단 하류측에 기인한 1단 압력 1 % 변화 : 증기유량 1.5 % 변화
- ⑪ 2단 상류측에 기인한 1단 압력 1 % 변화 : 증기

- 유량 1 % 변화
- ⑫ 고형미립자 침식에 의한 1단 노즐면적 10 % 증가 : 1단 6.5 %, 나머지 단락 3~4 %의 효율저하 및 증기흐름용량 2 % 증가
- ⑬ 관석 부착에 의한 1단 노즐면적 10 % 감소 : 증기흐름용량 3 % 감소
- ⑭ 압력손실 : MSV, CV 4 %, IV 2 %, Cross Over Pipe 3 % 발생
- ⑮ 단락 하류측 저항에 기인한 단락압력 1 % 증가 : 단락 상류측의 총동단락은 0.6 %, 50 % 반동단락은 0.7 %의 압력 증가

**화력발전소 CWD(Cooling Water Discharge)를 활용한  
해양소수력 개발의 기술적인 고찰  
(화력발전소 CWD와 조위특성과의 Harmony)**



**남양이앤이주식회사**  
**재생에너지 발전시스템**  
**전무/엄복진**  
**Tel:(02)2109-8130~3**

본 자료는 국내 화력발전소 방류구에 조위특성을 이용하여 발전시스템을 구축 해양소수력개발을 할 수 있는 최소한의 기술적인 해법을 미활용 에너지의 회수를 통한 전력생산으로 청정에너지 개발(CDM: Clean Development Mechanism)을 통해서 정부의 재생에너지 개발 정책에 부응하고 기후변화협약에 대응하기 위한 건설 목적을 가지고 있기 때문에 그 동안 태안화력, 영흥화력, 삼천포 등 해양소수력 개발 제안서와 삼천포 해양소수력에 실 투입된 설계 및 운전 실적을 토대로 작성한 것 입니다.

**요 약**

소수력 계획 시 개발지점에 대하여 수많은 자료와 정보 등을 필요로 하게 되는데 특히 해당지역내의 유량분포에 대한 유황자료는 개발의 판단여부를 결정케 하는 중요한 요소이다. 소수력발전소의 설비용량에 직접 관계되는 설계유량의 결정과 재해방지를 위한 유출의 예측을 가능케 하고 발전소운영 시 가동률 및 경제성에도 직접적인 영향을 미치는 중요한 요소이나 여기서 논하는 소수력개발은 하천이나 댐과 같은 유형이 아니라 일정한 유량을 확보하여 배출하기 때문에 문제는 없다.

그러나 계절별 부하에 따른 냉각수량의 변화 및 소수력 발전유량의 변동, 조위(해수면) 변화 등에 따라 달라진다. 그러므로 수위조절을 위한 수문은 이들의 변화에 따라 자동운전이 가능해야 하지만 운전시 발전정격수위를 맞출 수 있도록 수문을 조절한 다음 Turbine Governor에 의해 유량 및 수위를 제어할 수 있도록 설계하여 냉각수 순환수 계통에 영향이 미치지 않게 언제나 적정수위를 유지시킬 수 있는 운전모드로 구축하는 것이 안정이라 볼 수 있다.