

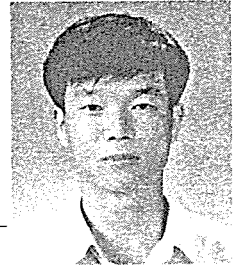
는 배럴식 펌프가 초고압 대유량에는 최선의 선택이 될 것이다.

모든 펌프는 나름대로의 이점을 갖고 있으므로,

펌프 사용자는 제조자와 발전소 요구 조건에 가장 알맞은 펌프의 시방과 형식에 관하여 협의하면 좋은 결과를 얻을 수 있다

## 복합화력발전 시스템과 에너지 이용효율

김 의 환 · 선임연구원  
한국전력공사 전력연구원  
수화력발전연구실



(042) 865-5118

### 요 약

최근 급증하는 전력수요에 따라 수도권에는 6개 복합화력발전소가 준공되어 전력생산은 물론이고 지역 난방시설까지 갖추어 지역난방을 공급함으로써 주민들에게 편의를 제공하고 발전소열효율을 극대화시키고 있다.

운용측면에서도 고효율의 복합화력발전소는 중간부하 담당용으로 이용될 것으로 생각되며 효과적인 에너지이용 효율차원에서 복합화력발전소의 성능관리에 지대한 관심을 가져야 할 것이다. 이러한 차원에서 복합화력중에서는 국내 최초로 플랜트 전범위에 걸쳐 성능진단을 수행한 안양복합화력발전소의 성능진단 사례를 중심으로 복합화력의 개념과 특징, 효율 등을 기술하였다.

### 1. 서 론

복합발전기술은 60년대 미국에서 정립되었으며 그 후 석유파동에 따른 에너지합리적이용이 제창되면서 이설비가 세계적으로 각광을 받게 되었다.

우리나라도 70년대말 비상수급전력의 일환으로 경유를 연료로한 복합발전설비가 영월, 군산, 울산에 각각 30만kW 총90만kW가 건설되어 전력공급에 일익을 담당하였다.

최근 '90년대들어 폭발적으로 늘어나는 신규전력소요량과 신도시의 대규모 집단 난방용 열공급시설 필요성과 맞물려 수도권 일원에 많은 복합화력발전소들이 준공되어 현재는 총 721만kW('96기준) 용량을 갖춘 설비로 발전하였으며, 전력생산은 물론이고 신도시 지역주민들에게는 4계절 난방용 증기를 공급하고 있다.

특히 신도시에 건설된 복합화력발전소들은 발전용 연료로 청정에너지인 LNG를 사용함으로써 대기오염물질 발생을 최소화시켜 종전의 발전소 이미지를 타파하였으며 도심에서도 지역주민과 공존할 수 있는 환경친화적인 기업으로 탄생하게 된 것이다.

또한 에너지 이용측면에서도 복합화력발전은 일반화력발전에 비하여 많은 장점을 가지고 있으므로 국내에서도 점차 설비가 늘어나고 있는 실정이다.

특히 폐열을 이용하여 증기터빈용 에너지를 생산하고 최종적으로 복수기에서 복수시키지 않고 난방용 열을 생산함으로써 사이클의 종합효율을 극대화시키는 것이다.

이러한 측면에서 실제적으로 현재 운용되고 있는 안양복합화력발전소의 성능진단결과를 토대로 복합화력의 시스템구성과 설비관리 및 성능관리 그리고 운전효율 등을 알아보기로 한다.

안양복합화력발전소는 가스터빈설비가 '1992년 6월에, 증기터빈 설비는 '1993년 6월에 각각 준공되어

운전되어 오던중 가스터빈 2호기와 증기터빈의 A급 계획예방 정비전 성능을 파악하고자 국내복합화력 설비중에서는 최초로 Full scale test에 의해 성능진단을 실시하게 되었다.

먼저 A급 계획예방전 성능진단은 '1995년 8월 16일부터 8월19일까지 수행하였으며 LNG 연료를 사용하여 가스터빈 Temp control 및 증기터빈 V.W.O 상태에서 이루어졌으며, 또한 예방정비전 성능저하 요인 분석을 위한 Base load에서의 시험과 함께 향후 발전소 성능관리를 위하여 부분부하에서의 참고 시험도 수행하였다.

한편 A급 계획예방후 성능진단은 전 진단을 바탕으로 근거로하여 설비의 성능복구 확인 및 또다른 저하요인 파악에 주력하였으며 '95년 12월 18일에서 22일까지 성능진단을 수행하였다.

## 2. 복합화력의 개요

### 가. 복합발전의 개요

복합화력 방식이란 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클을 조합한 발전방식으로써 가스터빈으로부터 나오는 고온의 배기가스를 이용하여 폐열보일러(HRSG)에서 생산되는 증기로 증기터빈을 돌리고 팽창과정중에서 증기의 일부를 추출하여 지역난방 또는 생산공정용 열원으로 사용하는 방식으로 열효율이 높은편이다.

복합발전 열병합 방식의 증기터빈은 배압터빈에 비하여 추기복수식이 비경제적이나 적응성이 좋아서 추기 복수식이 주로사용된다.

### 나. 복합발전의 특징

#### 1) 열효율이 높다.

Combined cycle발전의 설계열효율은 종래의 기력발전이 약 40%에 대해 현재 1300°C급 Gas turbine을 사용할 때 약 47%정도에 달하며, 기동정지 시간이 짧고 그손실이 적은점이 장점이므로 종래 기력발전에 비하여 약 10%의 연료절약을 가능케 하고 있다.

#### 2) 부분부하에서 열효율저하가 적다.

Combined cycle 발전은 비교적 소용량의 단위기를 조합시켜 대용량 플랜트로 구성한다.

따라서 출력의 증감을 단위의 운전대수의 증감으로 행함으로서 넓은 출력범위에서 정격출력시와 동등한 높은 열효율을 유지할 수가 있다.

#### 3) 기동정지 시간이 짧다.

소용량의 조합으로 되기 때문에 부하 변화율이 크게되며, 또 단위시간에 기동정지가 가능하다.

종래의 기력발전 Plant에서 600MW 급이 최소 2시간반 정도인것에 비하여 Combined cycle 발전 Plant 에서는 그 기동시간은 일축형일 경우에는 약 1시간 정도이다.

#### 4) 최대출력이 외기온도에 의해서 변화한다.

Combined cycle 발전은 Gas turbine을 주체로 구성되기 때문에 그 최대출력은 외기 온도에 의해서 크게 변화하고 외기온도가 낮을수록 크다.

이것은 다음과 같은 이유 때문이다.

가스터빈은 그 Blade의 고온역에 있어서 내구성의 관점에서 가스터빈 제1단 입구 연소 Gas 온도의 상한을 정하여 운전된다.

한편, Compressor 의 흡입가능한 공기용적은 대략 일정하므로 공기온도가 낮아져서 공기밀도가 증가하면 흡입가능 공기 중량은 증대되는 것이다.

또, 이 경우 흡입온도의 저하에 따라 압축후의 공기온도도 저하하므로, 가스터빈 입구 연소가스 온도의 상한치까지의 가열대가 크게되어 흡입공기량의 증가와 상승하여 많은 연료를 투입하는 것이 가능하게 되는 결과, 가스터빈의 최대출력은 증대한다.

따라서 위에서 논한바와 같이 Combined cycle 발전의 최대 출력은 대기온도 저하에 따라 증대하게 된다.

#### 5) 온 배수량이 적다.

Combined cycle 발전플랜트의 증기터빈은 그 입구 증기조건이 기력발전 플랜트에 비하여 낮으며 분담하는 출력은 플랜트 전체의 3분의1로 적기 때문에, Combined cycle 발전플랜트의 온배수량은 동용량의 기력 발전플랜트의 60~80%정도에 불과하다.

#### 6) 사용연료에 의한 성능변화가 크다.

Combined cycle 발전플랜트 중에서도 특히 배열회수식의 경우에는 그 우수한 특성을 효과적으로 발휘시키기 위해서는 현재의 기술수준에서는 깨끗한 연료의 사용을 요한다.

현재 운전, 혹은 건설 계획중의 배열회수식 Combined cycle 발전플랜트에 있어서 사용연료는 LNG, LPG, 등 깨끗한 가스연료, 혹은 유황분이 적

고, 질이 좋은등유에 한정되어 있다.

Fig.1은 전형적인 복합화력발전소의 Heat balance 로 시스템을 파악하는데 대단히 유용하다.

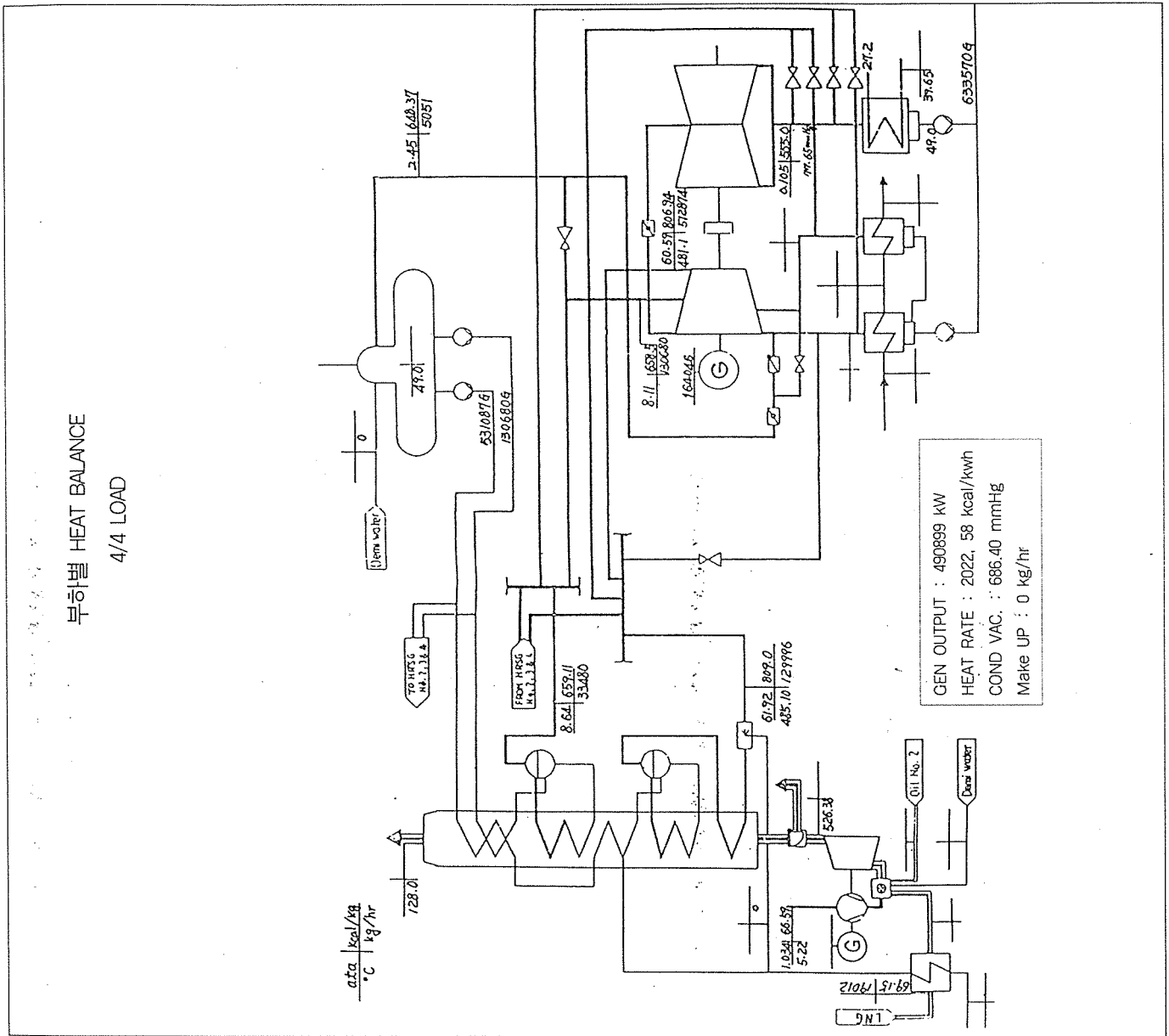


Fig 1. 복합화력의 Heat Balance

### 3. 설비개요

Table 1. Turbine(Gas & steam)

Division	Gas Turbine	Steam turbine	Remark
Type	단순개방형	Reaction turbine	
Capacity (kW)	79,400 × 4	162,600	
Revolution(rpm)	3,600	3,600	
Stage	18	30	
Efficiency(%)	29.01	76.56, 43.92	Mode I Mode III

Table 2. Generator

Division	Gas Turbine	Steam turbine	Remark
Type	Air cooling	Air cooling	
Capacity(MVA)	119.2×4	180.11	
Voltage(kv)	13.8	16.0	
Power factor	0.9	0.9	

Table 3. HRSG

Type	단순개방형, 비조연
Capacity(t/h)	HP Drum : 131, LP Drum : 38

Table 4. District heater

Type	Shell & tube, HP & LP	Remark
Capacity (kW)	344.0	Mode I
	444.3	Mode IV
Heater in/out	90/115	HP HTR
temp(°C)	65/90	LP HTR
Heating area(m <sup>2</sup> )	4965	HP, LP

#### 4. 진단내용

##### 가. 진단범위

성능진단은 O/H 전후 공회 가스터빈 부분, HRSG부분, 증기터빈부분 그리고 소내전력 부분으로 나누어 수행하였으며 운전상태에서 에너지 손실요인도 함께 조사 하였다.

##### 나. 진단기준

가스터빈 : ASME PTC 22  
 HRSG : ASME PTC 4.4  
 증기터빈 : ASME PTC 6S  
 기타 : 성능시험 지침(1987)

##### 다. 운전기준

운전Mode : Temperature control mode  
 사용연료 : LNG  
 Steam turbine inlet valve wide open

#### 라. 계측방법

Steam turbine 기준유량: Deaerator inlet에서 Orifice 차압을 Manometer로 측정

Steam turbine 2차 유량: Spray water, Aux steam은 data logger이용

Sampling flow는 실측하고 각 Tank 수위 변화를 계산

HRSG flue gas분석은 Exhaust duct에서 자체 보유 IMR 을 이용하여 측정

Temperature 측정 : 정밀급 Thermocouple 사용  
 Pressure 측정:고압은 Pressure transducer 를 사용하고 저압은 Manometer 사용

전력량측정 : 정밀급 전력량계 사용

정압, 동압 측정 : HRSG exhaust duct 에서 Dust sampler를 이용하여 측정

#### 5. 진단결과

Table 5. Gas turbine efficiency (Simple cycle)

division	unit	design value	acceptance value	before O/H	after O/H	difference
power output	kW	79,400	79,880	78,496	79,203	+707
thermal efficiency	%	29.01	29.12	28.27	28.43	+0.16

터빈효율이 향상된 것은 압축기의 압축비 상승(11.83→12.73)과 터빈 내부효율증가(84.90→85.36%)에 기인함.

Table 6. #2 HRSG efficiency (Input & output method)

division	unit	design value	acceptance value	before O/H	after O/H	difference
calculation	%	78.90	-	78.45	75.40	-3.05
correct	%	78.00	-	77.60	77.47	+0.13

HRSG 효율저하의 원인은 HRSG 전열면의 오염에(총열흡수율78.23→77.19%) 따라 저하되었음.

Table 7. Steam turbine efficiency

division	unit	design value	acceptance value	before O/H	after O/H	difference
power output	kW	79,400	79,880	78,496	79,203	+707
efficiency	%	30.40	-	30.05	30.27	+0.22

복수기 진공도 향상(0.127→0.105ata)과 Turbine by-pass valve에서 Leak되는 누설유량의 감소로 터빈효율이 증가됨

Table 8. Combined cycle efficiency

division	unit	design value	acceptance value	before O/H	after O/H	difference
c/c power output	kW	478,400	481,592	472,590	489,738	+17148
c/c efficiency	%	43.97	44.36	42.53	42.90	+0.37

Gas turbine & steam turbine 성능향상으로 복합사이클의 열효율이 향상된 것으로 나타남.

## 6. 진단결과에 대한 고찰

O/H 전 진단을 통하여 성능저하요인을 정밀분석하여 O/H 작업사항에 반영하여 성능을 향상시켰으며 성능변화요인을 이론적으로 고찰하여 복합화력에 대한 이해와 설비운영방향을 제시하고자한다.

### 가. Gas turbine 의 열효율(성능변화) 요인

Gas turbine 의 열효율을 높게하기 위해서는 열사이클에서 고열원과 저열원의 온도비를 크게 할 필요가 있다. 저열원은 통상 대기로 부터 일정하므로 연소가스의 온도, 즉 터빈입구의 온도를 높게하면 할수록 열효율은 향상된다.

#### 1) Compressure inlet static pressure loss

Compressure inlet static pressure loss의 증가는 IGV 개도가 동일하다면 압축기 유로부분의 저항증가(오염) 현상으로 볼수있으며, 일반적으로 가스터빈 전체성능저하가 있는 경우 압축기 오염에 의해서 Air Flow감소로 나타나는 압축기 성능저하가 상당히 큰

Portion을 차지하게 된다.

#### 2) Compressor inlet air temp

개방형 Gas turbine cycle에서 대기온도가 출력 및 효율에 미치는 영향은 지대한데 다음과 같다.

대기온도저하는 공기밀도를 증가시키므로 압축기에 유입되는 공기 질량유량(Mass flow) 을 증가시켜서 더 큰 출력을 발생하게 한다.

압축기의 특성상 압축기의 소요동력은 Compressing 되는 유체의 Volume flow에 따라 변동되므로 가스터빈의 압축기와 같이 정속으로 운전되는 경우에는 압축기입구에서의 Voume flow는 변동되지 않으므로 소요동력변화가 없게된다.

그러나 가스터빈에 채용되는 압축기의 형태는 1단 압축형태가 아닌 다단 압축형태이므로, 각단을 통과하면서 어떠한 형태로 나타날것인가에 대한 의문이 있을수 있으나, 압축기 각단의 효율이 변동되지 않는다면 전체에 대한 소요동력은 입구Volume flow의 변동이 없는한 변동되지 않는다.

한편 가스터빈의 연소기 출구온도는 항상 일정한 온도를 유지하도록 연소기에 공급되는 연료량을 제어하게 되며, 같은 양의 Volume이라 할지라도 압축기 입구온도가 저온일 경우에는 연소기에 공급되는 공기의 Mass flow는 증가하기 때문에 연소기 출구온도를 일정한 수준으로 하기위해서는 많은양의 연료를 투입할수 있게 되어 결국 터빈에 공급되는 전체 Gas 의 Volume flow가 압축기 입구온도가 높을 경우보다 증가하게 되어 출력 증가를 가져 오게 되는것이다.

한편, 대기온도 저하가 가스터빈 효율상승을 초래하는가에 대한 이론적인 논리는 터빈의 설계조건이 어떠한가에 따라 달라질수 있다고 생각되는데, 일반적으로 대기온도의 저하는 터빈효율의 상승을 가져오는 것으로 볼 때, 가스터빈은 유량(Volume flow)의 증가에 따라 효율이 증가되는 형태로 설계되고 있는 것으로 생각된다.

또한, 이를 뒷받침할 실례로 증기터빈의 경우에도 터빈입구의 초온, 초압의 증가는 효율을 상승시키는 조건이된다.

#### 3) Generator power factor

발전기에서 발생하는 손실은 부하 및 Power factor

에 따라 변동되므로 이 일정부하에서의 Power factor 는 가스터빈의 출력 및 효율에 영향을 주는 요소가 된다.

일반적으로 설계치보다 높은 Power factor 운전은 효율증가 및 유효전력 증가를 가져 올수 있다.

#### 4) Compressor & turbine internal efficiency

Turbine internal efficiency의 의미는 단열 엔탈피 변화에 대한 실제 엔탈피 변화비를 나타낸다.

이러한 Turbine internal efficiency은 엄밀한 의미에서 효율의 개념은 아니지만, 똑같은 방법으로 계산하여 전후비교를 하는 개념으로 사용하는데는 상당한 가치가 있다.

##### 가) Pollution of compressor turbine

일반적으로 가스터빈은 운전시간 경과에 따라 오염이 필연적으로 나타나므로 오염에 따른 성능저하를 정확하게 예측하여 이에 대처하는 기술이 요구된다.

터빈의 내부효율 변화는 주로 기기내부의 오염상태 변화에 의해 나타나는 경우가 많다.

따라서 압축기의 오염과 대책에 대해서 간략하게 기술하고자 한다.

여기서 언급한 운전시간 경과에 따른 성능저하를 예측함에 있어 나타나는 각종수치는 다음조건을 가정한 추정치이다.

- 엔진은 설계대로 정확하게 제작되었고
- 보이지 않는 문제점들은 없으며
- 유지보수가 잘 이루어지고
- 운전제한치 이내로 운전이 되며
- 기동시 과열온도 상승이 없었으며
- 최대부하에서 빈번한 Unit trip이 없었고
- 주기적인 세정(출력저하가 2~3%에 달할 때)이 실시되었다면

3년후 영구적인 성능저하는, 세정실시후 LNG연료 연소시에는 약 1.25%, DO연료 연소시에는 약1.75%에 이르며, 이와같은 백분율은 출력과 열소비율에도 그대로 적용할수 있다.

또한, A급 예방정비시 흐름통로부의 완벽한 보수 및 청소로 영구적인 성능저하를 거의 복구할수 있으며 회복되지 않고 남는 성능저하는 LNG & DO연료 연소시 공히 약 0.25% 정도가 된다.

##### 나) 대책

-최적의 여과 설비 유지한다.

-Blade 표면의 Scale를 제거하여 매끄럽게 유지시킨다.

-청정연료를 사용한다.

-Compressor의 Fouling을 주기적으로 관리한다.

-주기적인 Off-line cleaning을 실시한다.

-운전조건을 준수하고, 적절한 유지보수를 시행한다.

-과열방지 및 급작스런 Trip을 방지한다.

-손상된 부품을 적절하게 교체하여 준다.

#### 나. HRSG 성능분석

HRSG의 성능은 Tube의 오염정도 변화에 의한 열 흡수율 변화에 따라 변동하게 된다.

단 HRSG는 Gas turbine의 배열을 회수하는 장치이므로, Gas turbine의 운전상태에 따라서 효율측정 결과치가 변하게 되는데, 일반적으로 Gas turbine exhaust flow 100 t/h변화에 약 0.32%의 효율변화를 하게되는 것으로 나타나있다.

Gas turbine exhaust temperature 10°C변화에 따라서는 약 0.55%의 효율변화를 가져오는 것으로 알려져 있다.

특히 HRSG 는 전열면 Tube의 오염정도에 따라 효율저하 폭이 심한편이므로 주기적인 오염물질 제거가 요구되며 Flue gas 통로의 연결부나, By-pass damper등 틈새에서 Flue gas 가 누설되는 경우가 많으므로 세심한 관리가 필요하다.

#### 다. 증기터빈의 효율변동 요인

증기터빈의 성능은 증기터빈 Nozzle 및 Blade 표면상태의 변화와 각 단의 Sealing장치의 변화에 의해서 변동되며, 터빈의 설계특성상 터빈입구에서의 증기의 상태 즉, 증기의 압력과 온도변화에 의해서도 증기터빈의 효율은 변동될수 있다.

##### 1) 증기터빈의 단락효율

증기터빈의 단락효율은 터빈의 Nozzle 및 Blade의 상태변화를, 즉 각단의 Sealing 장치의 변화를 나타내어 준다.

그러나 측정조건이 매우 까다롭고 측정결과의 Uncertainty 가 매우크다.

2) Main steam pressure

증기터빈 각 단락에서 증기의 압력과 속도는 비례 관계가 있으므로 주증기 압력변화는 터빈의 각 단락에서의 속도삼각형 형태를 변화시키기 때문에 터빈 효율이 변동하는 조건이 된다.

3) Main steam temperature

Main steam temperature 의 변화는 터빈 각 단락에 작용하는 증기의 비체적을 변화시키므로 각 단락에서의 증기속도 변화를 유발하여 Nozzle 및 Blade 에서 증기의 속도 삼각형의 변화를 가져오므로 터빈 효율의 변동 조건이 된다.

또한 Combined cycle 에서는 Gas turbine exhaust flue gas 의 상태에 따라서 발생증기의 상태가 변동 되기 때문에 증기터빈의 운전상태가 변화하면 효율 또한 변동하게 된다.

7. 진단효과

O/H 전 성능 저하요인을 파악하여 정비작업시 반영한 결과 O/H 후 성능진단시 다음과 같은 개선효과를 얻어낼수 있었다.

Table 9. Improved effect after O/H

division	improved contents	improved effect
1. #2 G/T 효율향상	- 흡,배기계통 오염물질제거 및 손상부품 교체 - 연소설비 Inner collar 교체	효율향상 (28.27→28.43%) 연료비절감금액 : 79,744천원/년
2. #2 G/T 출력증가	- Burner에 부착된 탄화물제거 - 터빈Blade1,2,3단 교체 - Inlet filter 교체 - Water washing - 기타	출력증가 (78496→79203kW) 연료비절감금액 : 63,316천원/년
3. 증기터빈 주증기압력 정격유지	- HRSG본체 및 내부Cleaning - 주증기 Control valve 적정운전 - 각종 Valve 분해정비	정격압력유지 (59.05→60.59ata) 연료비절감금액 : 33,597천원/년
4. 증기터빈 by-pass 밸브 누설차단	- 해당Valve 분해정비	누설증기차단 절감금액 : 113,920천원/년
합 계		290,577천원/년

8. 결론

복합화력발전방식은 여러 가지 측면에서 장점을 가지고 있는 것으로 알려져있는데, 본고에서는 복합화력의 일반적인 개념과, 실무자로서 직접 체험한 성능진단 실패를 들어가며 설명하였지만 궁극적인 발전소 운용의 두가지 지표는 안정운용과 효율적 운용이라고 할 수 있다.

그동안 급증하는 전력수요를 감당하기 위하여 안

정적인 전력공급에는 주력하여 왔지만 에너지의 낭비요인을 제거할 수 있는 성능진단에 의한 효율적인 운용이 이에 못지않게 중요하다는 사실을 모두가 인식해야 할것이다.

특히 복합화력은 기력에 비하여 설비가 복잡한 편이며, 최근에 각광을 받고있는 설비로써 설비의 안정운용과 효율향상을 위하여 모든 노력을 경주해야 할 것이다. 끝.