



# 발전설비 상태진단을 위한 주기 성능시험 제안



임도형  
dhlim@ewp.co.kr

경북대학교 금속공학과 학사  
한양대학교 공학 석사  
한국동서발전(주) 차장

우리나라의 매출액 기준 전력생산 비용에 대한 원가구성 비율을 보면 연료비 70%, 설비 감가상각비 20%, 수선유지비 4~5%, 인건비 3~4% 및 기타 비용으로 구성된다. 이 중 연료비와 감가상각비는 비율이 절대적으로 높지만 이를 효과적으로 관리하여 비용을 줄이는 데는 한계가 있다. 따라서 발전설비의 이용률 향상과 정비 비용 절감에 대한 경쟁이 본격화되면서 발전설비에 대한 신뢰도 확보 및 경제성 향상을 위하여 불필요한 계획예방정비업무의 감축을 비롯하여 최적 정비 관리기법이 지속적으로 개발되고 있다.

이러한 발전설비 정비에 대한 관점과 중요성의 인식변화에 따라서 국내에서도 기존의 주기적인 정비(time based maintenance) 및 사후 고장정비 위주의 수동적인 정비(reactive maintenance) 방식에서 벗어나, 정보 인프라를 구축하여 실시간 운전상태 감시를 보장하고 이를 연계하는 상태중심의 예측정비, 그리고 설비의 기능과 고장의 체계적인 분석을 통하여 기기 신뢰도에 기반을 두고서 정비 자원의 최적 분배를 추구하는 신뢰도 기반 정비(reliability centered maintenance) 같은 능동적인 정비(proactive maintenance) 방식을 도입하고 있다. 그러나 과학적 데이터에 근거하지 않은 정비주기 설정은 경제성 및 기기신뢰도에 심각한 저해요소가 된다. 본 고에서는 이러한 기기신뢰도 분석도구로서 기존의 윤회유 분석, 진동 분석 등과 같은 분석도구의 하나로 성능분

석을 활용하여 화력발전소 예방정비업무 개선에 기여하고 기존 발전소 계획예방정비 전후 성능 시험의 새로운 대안을 제시함으로써 글로벌 경쟁력을 갖춘 발전소 운영능력 향상에 기여하고자 한다.

## 1. 발전설비 정비운영

### 1.1 정비방식의 분류

#### 1.1.1 계획 정비

계획정비는 다시 고장정비와 예방정비로 분류되며 이중 고장 정비는 설비가 고유설계 기능을 더 이상 수행하지 못할 때 기능회복을 위하여 정비를 한다. 고장정비는 예방정비가 감소함에 따라 더 많아지게 되며 대부분 화력발전소에서는 TM(trouble memo)이란 명칭으로 통용된다. 예방정비는 계획, 작업수행, 시험등이 포함되는데 이것들은 고장정비와는 달리 설비를 수리하는 것이 아니라 주기적으로 설비의 운전성이 만족될 수 있도록 설비성능을 감시하는 것이다.

예방정비에는 시간기준정비와 상태기준정비가 있다. 먼저 시간기준정비 방법은 설비상태와는 무관하게 수행되는 주기적인 모든 예방활동들을 포함하며, 실제적으로는 설비상태를 회복시키거나 향상시키는 활동이다. 이 정비의 목적은 수명이 다된 것을 교체하는 것이 아니라 운전할 수 있는 설비를 미리 교체함으로써 기기를 새로운 상태로



되돌려 놓기 위한 것이다. 시간기준 정비에서 한 단계 발전한 것이 상태기준 정비이다. 상태기준정비에는 감시(monitoring), 고장발견 시험(failure finding tests) 및 검사(inspection) 등이 포함되며, 상태기준 정비에는 예측정비 및 선행정비 등의 능동적인 정비방식이 있다. 이 중 예측정비는 설비의 성능이 저하되고 있다는 것을 조기에 감시하기 위해 설비의 운전특성을 감시하도록 고안된 것으로 적절히 사용될 경우 설비 이용성을 증가시킬 수 있는 좋은 방안이 될 수 있지만, 너무 이른 감지능력은 신뢰성에 영향을 줄 수 있기 때문에 정상적 예방정비운영의 일부로써 병행 사용된다. 예측정비 운영에는 진동감시, 온도분석, 오일분석, 전류분석, 음향감시, 저항측정, 열 영상분석 등과 같은 기법들이 포함된다. 선행정비는 예측정비 형태 이후에 생성된 새로운 정비 개념으로 설비의 고장을 초래할 수 있는 근본원인을 사전에 제거함으로써 설비의 고장발생이 시작되기 전에 방지하는 개념이다. 선행정비는 진동증가, 온도상승, 윤활유 마모입자 증가 등의 원인이 될 수 있는 요소를 찾아내어 사전에 제거해 준다는 개념으로 예측정비 보다 한 단계 앞선 활동이다.

### 1.1.2 비계획 정비

비계획 정비는 설비가 고장이 발생된 후에 수행된다는 특성이 있으며 보통 돌발정비라는 표현으로도 통용된다.

## 1.2 예방정비 운영방식

### 1.2.1 현행 예방정비 운영방식

여기에서는 국내 대부분 발전소에서 현재 운영 중인 시간기준정비 운영방식에 대해 살펴보고자 한다.

경상 예방정비는 발전설비를 가동 중에 주기적으로 운전상태, 윤활, 이음, 진동 등을 점검하거나 예비설비를 분해 정비하여 기기 성능유지와 불시 고장정지를 예방하는 것으로 아래의 방식으로 진

행된다.

#### ① 예방정비 점검표준 설정

기기별 중요도, 정비 비용, 고장 후 정비비용, 예비기 보유상태 등을 검토하여 예방정비 대상기기를 선정한 후 점검항목 및 점검주기를 결정한다.

#### ② 예방정비 점검 연간계획 수립

표준설정에 의한 대상기기, 점검항목 및 점검주기에 따라서 연초에 설비별 운영부서와 정비부서 간의 협의에 의하여 연간 작업 총괄계획을 주간, 월간, 분기, 반기 등의 적절한 주기로 정비인력 등을 고려하여 작성한다.

#### ③ 예방정비 점검시험

일상 점검 및 순회 점검을 통하여 설비 가동상황 및 열화상태를 파악하여 점검표 기재 및 이상시 즉시 정비 조치한다.

#### ④ 정비요청 및 정비검수

예방점검을 수행 중 설비가 정상적인 상태인 경우는 예방점검 카드에 의하여 점검 수행자는 감독원의 확인을 받는다. 만약 이상을 발견시에 조치 가능시는 예방정비작업을 수행하고 설비의 개선 또는 장시간을 요하는 작업의 수행시는 작업 의뢰서를 발행하여 계획을 수립하고, 정비 업무를 수행 후 감독원의 확인을 받고 종결한다.

#### ⑤ 발전설비 정비기록

정비 업무를 수행한 후 정비일자, 정비 주요내용, 소요자재, 운전시간 등을 기록한 발전설비 정비기록을 기기이력카드에 기록 관리한다.

계획예방정비는 발전설비를 일정기간 가동 후 기기상태와 제작사 측의 기준, 과거 정비 사례 등을 고려해 사전에 계획을 수립하여 발전기의 가동을 일정기간 동안 중단하고 시행하는 정비로써 설비의 안전운전, 기기의 성능유지 및 법정 보안감사 대비를 주목적으로 하고 있다.

간이예방정비는 취약설비의 정비를 위하여 연휴 기간이나 전력 예비율이 여유가 있는 시기를 이용하여 약 10일 이내에서 발전기 가동을 중지하고 시행하는 정비로써 고장정지 감소와 여유설비



를 예방정비에 활용하고 계획예방정비 공기단축 및 주기연장에 기여하고자 하는 목적이 있으나 간이예방정비는 가능한 안 하는 것을 원칙으로 한다.

### 1.2.2 현행 예방정비 운영방식의 문제점

현행 발전소에서 운영되고 있는 예방정비 방식은 대부분의 화력발전소에서는 시간기준정비(time based maintenance) 체계로 일정한 주기에 따라 예방정비업무가 수행되고 있는데 이는 상태기준 정비체계에 비해 정비기간이 길고, 단순 반복적으로 수행되기 때문에 정비의 신뢰성도 낮다. 정비기간이 길어지면 정비비의 증가뿐만 아니라 막대한 전력판매액의 손실이 된다. 이와 함께 시간기준 정비 체계는 잦은 주기의 정비수행을 요구할 수 있어 중요한 발전설비의 예방정비를 누락 또는 등한시 하게 될 수 있다.

이런 시간기준 정비체계가 지속되는 이유는 예방정비는 자주 할수록 좋다는 단순한 논리와 과거의 기준에 집착하여 예방정비 대상기로 선정 또는 정비주기를 설정하여 서류화된 정비이력 근거나 과학적인 데이터가 일반적으로 많이 부족한 실정이다. 또한 설비를 공급하는 제작사는 설비와 함께 운전 및 정비지침서를 제공하는데 일반적으로 예방정비 권고사항을 비용 효과적 측면보다는 설비보증 측면에서 작성하는 경향이 많기 때문에 제작사의 권고사항이 운전 환경과 달라도 무조건적으로 수용되는 경우가 많다. 따라서 발전설비에 대한 신뢰도 확보 및 경제성 향상을 위하여 불필요한 계획예방정비업무의 감축을 비롯한 최적 정비 관리기법의 개발은 매우 중요하며 이를 위해 과학적인 데이터를 활용한 설비 상태진단이 절실히 요구되므로 주

기성능시험을 통한 상태진단 방법을 제안한다.

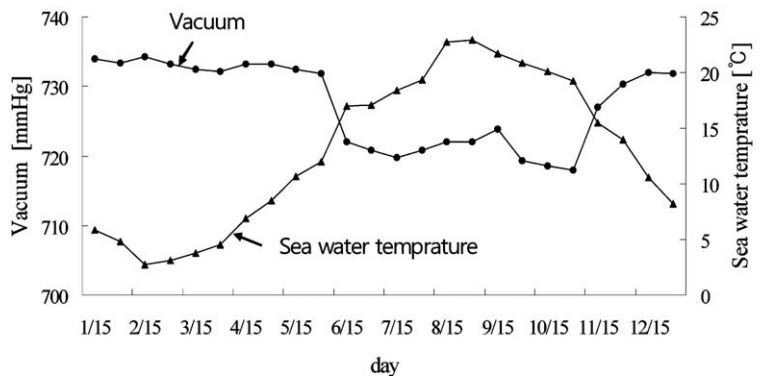
## 2. 상태진단을 위한 주기 성능시험

### 2.1 주기 성능시험

#### 2.1.1 방법

주기 성능시험은 설비 상태진단을 목적으로 계획수립, 사전 준비, 계통의 격리, 시험 진행 및 결과 보고 순으로 진행된다. 계획수립 단계에서는 성능시험 실시 시점, 성능시험 부하의 종류, 성능시험의 주관 등 성능시험 방법을 정하는데 이 중 주기성능시험에서 특별히 중요한 요소가 실시 시점과 시험부하의 결정이다.

성능시험 실시 시점 결정시에는 성능시험의 신뢰도를 높이기 위해 무엇보다도 일관성의 유지가 중요하다. 따라서 현재와 같이 계획예방정비 전 3개월 이내, 계획예방정비 후 1개월 이내에 실시하여서는 반복되는 시험의 일관성 유지가 어렵다. 그림 1에 일년 동안 발전설비의 해수온도 변화와 그에 따른 진공도의 변화를 그래프로 나타내었는데 계절별로 변화가 매우 심하다. 따라서 성능시험의 신뢰도 향상을 위해 각 발전소 별로 매년 일정한 시기를 정하여 비슷한 해수온도에서 시험을 하는 것이 바람직하다. 이 시기도 일관성을 유지하기 위해 발전소 준공시점의 인수성능 시기로



[그림 1] The changes of sea water temperature & vacuum in condenser



결정한다면 같은 조건에서 설비 성능 비교가 가능할 것이다.

성능시험시 발전소 출력은 다양하며 이 중에서도 기존 계획예방정비공사 전, 후 성능시험은 최대가능출력, 정격출력의 100%, 75%, 50%, 최소안정부하에서 각 1회씩 실시하여 왔다. 여러 가지 문헌과 외국의 사례를 조사한 결과 성능시험의 출력으로는 반복되는 성능시험의 일관성 유지를 위해 벨브 전개 출력이 가장 바람직하지만 우리나라의 경우 전력계통의 신뢰성을 무엇보다도 중요시 하므로 성능시험 중 갑작스러운 설비의 문제점 발생을 방지하기 위해 정격출력을 기준으로 하고, 현행 계획예방정비공사 전후 성능 시험에서 부분부하 시험은 전력거래용으로 부하대별 연료사용량 산출에 중요하지만 설비의 신뢰도를 측정하기 위해서는 그 중요도가 떨어지므로 주기성능시험에서는 이를 생략하고 정격출력에서만 성능시험을 실시하는 것이 가장 바람직하다. 계획단계에서 중요한 사항을 결정 후 시험을 위한 사전준비를 하는데 이때 성능시험에 사용될 연료 확보, 계측기 설치 및 조정, 중앙급전소 등에 성능시험 출력 확보 및 요청 등을 하는 단계이다.

성능시험의 진행 단계에서는 미리 계획된 부하에서 성능시험 결과에 대한 정확도를 높이기 위해 시스템 상태변수 외부로 유출되는 유량을 최대한 억제된 상태에서 시험을 진행한다. 성능시험시 핵심적인 상태변수 측정용 계측기의 정확도는 성능시험결과의 신뢰수준과 밀접한 관계가 있다. 현재 전력그룹사에서 사용하는 발전설비의 인수 성능시험과 비용 평가 성능시험의 주요 계측기의 정확도 기준이 정립되어 있다. 하지만, 각 발전소에서는 이 기준을 충족하는 계측기를 상시 운영하고 있지 않으므로 성능시험 주관기관에서 계측기를 성능시험용으로 별도 설치하여 성능시험을 실시한다. 이렇게 일부 성능시험을 별도 계측기 설치로 진행하기 때문에 서로 다른 계측기를 사용한 인수 성능시험과 주기 성능시험과의 상호

비교는 계측기 오차로 인해 곤란하기 때문에 체계적인 발전설비의 성능관리가 힘든 현실이다. 이런 문제를 해결하기 위해 주기 성능시험의 계측기 정확도 기준을 새롭게 정립할 필요가 있다. 이 기준은 각 발전소 건설 및 설비 교체시 계측기에 대한 투자 효율성(cost effectiveness)을 고려하여 산정할 필요가 있다. 물론 많은 비용을 투자하여 정확도가 높은 계측기를 설치하면 시험의 신뢰도 확보에는 도움이 되지만 그에 따른 비용 증가는 발전소에 부담이 될 수 있어 적절한 수준으로 기준을 정할 필요가 있다.

이와 같이 발전소 별로 일정 수준의 정확도를 갖춘 동일한 계측기로 주기 성능시험을 진행한다면 매년 반복되는 주기 성능시험의 상호 비교를 통한 신뢰도 확보에 크게 기여할 것으로 기대된다. 이와 더불어 각 상태변수 측정용으로 사용되는 모든 계측기는 성능시험 전에 반드시 교정되어야 하며 필요시 성능시험결과에 크게 영향을 미치는 측정항목의 계측기는 성능시험 후에도 교정하여 확인하여야 한다. 또한, 성능 계산에 있어서 중요 입력 변수들이 센서 이상 등의 이유로 정상적인 값이 들어오지 않을 경우에도 정상적인 성능 시험 결과를 도출하기 위하여 데이터 검증(data validation)이 필요하다. 데이터 검증은 과거 운전 데이터를 이용하여 입력 변수들을 가장 적절하게 설명할 수 있는 상관관계식을 찾고 그 상관관계식으로 검증을 할 때 유효한 값을 인정할 허용 오차 범위를 선정한다.

성능시험의 종료 후에는 성능시험 일시, 성능시험 조건, 계측방법, 측정요령, 성능시험 항목, 결과 계산 절차, 결과 분석 및 고찰 등의 내용을 포함하여 성능시험 결과 보고를 실시한다.

### 2.1.2 성능관리 프로그램의 활용

성능분석을 통한 발전설비의 상태진단을 위해서는 시험 결과 분석도 중요하지만 성능저하를 확



인할 수 있는 기준값 및 과거 시험값과의 비교도 매우 중요하다. 이를 위해 발전설비의 성능관리를 신뢰성 있고 효율적이며 체계적으로 수행하기 위해 개발된 POMMS(Plant Operation and Maintenance Management System) 시스템을 활용하여 성능시험을 수행함으로써 보다 신뢰성 있는 성능분석을 통한 상태점검이 가능할 것이다.

POMMS 시스템은 화력발전소의 경제적 운영을 위한 성능 및 운전관리 최적화를 구현하기 위한 효과적인 성능감시 시스템으로 PC 환경의 보일러, 터빈, 보조기기 등의 주요 운전상태를 감시하는 국내 화력발전소 여건에 맞는 실시간 성능감시시스템이다. 이 시스템 프로그램의 구성은 성능관련 계산 모듈의 집합으로 구성되어 있으며, 각 모듈들은 독립적인 기능을 수행하거나 서로 유기적으로 연결되어 성능감시에 필요한 계산을 수행, 지원하고 사용자에게 계산된 결과를 제공한다.

표 1은 POMMS의 모듈구성 체계이다. 종합성능, 보일러, 터빈, 운전값 조회 및 환경설정의 5개 모듈과 총 28개의 서브모듈로 구성되어 있다. 종합성능 서브모듈 1개, 보일러 서브모듈 4개, 터빈 서브모듈 12개, 운전값 조회 서브모듈 1개, 환경설정 서브모듈 10개 등 28개 모듈로 되어 있고 각 모듈과 서브모듈간 인터페이스 연결은 하이퍼링크 또는 트리 메뉴구조로 이루어져 신속하고 편리하게 접근할 수 있도록 하였다.

### 1) 종합성능 모듈

발전소전체 성능을 모니터링 하는 화면으로 주증기, 재열증기, 급수, 스프레이 등 주요 증기 흐름에 대한 유량, 온도, 압력이 표시되며, 보일러, 터빈 및 플랜트 전체의 효율과 변화 트렌드가 표시된다. 종합성능 모듈에는 발전소 개요 모듈이 있다. 이 모듈은 플랜트 전체에 대한 중요 성능지표에 대해 기준값과 현재값을 비교 표시하며, 터빈계통의 중요 운전정보를 표시한다. 주요 표현 성능 지표는 보일러 효율, 터빈 효율, 플랜트 효율,

열소비율 및 주요 스팀계통의 운전 물성 값이다.

### 2) 보일러 모듈

보일러 모듈은 효율 및 열손실, 열 흡수율, 공기 예열기 기능, 공기에열기 총 4개의 보일러 관련 서브모듈로 구성되며 주요 성능지표는 각 모듈화면에 표시된다. 보일러 성능과 관련된 주요 계산결과, 성능지표 및 주요 운전값들이 체계적으로 정리되어 있으며 한번의 클릭으로 실시간 성능값, 성능그래프, 성능 항목간 그래프 비교가 가능하며 단위기기별로 원하는 항목에 대해서 현재 및 과거 이력에 대한 데이터를 얻을 수 있다. 아래에는 이 중 가장 중요한 효율, 열손실과 열흡수율 2개의 서브모듈에 대해 살펴보았다.

#### ① 효율, 열손실 서브모듈

효율, 열손실 서브모듈의 주요 성능지표로는 미국기계학회(ASME) 코드에서 제시하는 화력발전소 보일러의 기본적인 열손실 항목을 모두 포함하고 있다. 주요 성능지표 계산결과를 시각적으로 구현하고 보일러 경계에서의 건배기 가스손실 등 보일러 주요 손실항목을 중점 모니터링하도록 텍스트화하여 화면 상부에 나타내고 화면 하부에는 관련 손실과 효율의 추세를 선택하여 그래픽화 하였다. 주요 표현 성능지표는 보일러 효율, 건배기 가스손실, 연료내 수분 손실, 미연손실, 미측정 손실 등이다.

#### ② 열흡수율 서브모듈

보일러 열흡수율 서브모듈은 보일러 내부 튜브군을 구성하는 절탄기, 수냉벽, 과열기, 재열기에 대하여 연소가스로부터 열을 흡수하여 증기발생에 사용된 흡수열량을 산출하고 각 튜브군별 열흡수 정도를 나타내는 지표를 만들어 기준값과 현재 값을 제공한다.

### 3) 터빈 모듈

터빈 모듈은 10개의 주요 서브모듈로 구성되어 있으며, 서브모듈로서 급수가열기의 고압과 저압



<표 1> Modules and submodules of POMMS

No	Module	Submodule
1	Plant total performance	Plant overview
2	Boiler	Efficiency & heat loss
		Air heater unit performance
		Air heater total performance
		Heat absorption rate
3	Turbine	Heat balance
		Balance chart
		Turbine internal efficiency
		Turbine rotor power
		Turbine stage pressure ratio
		Turbine extraction stage efficiency
		Feedwater heater performance
		Low pressure feedwater heater
		High pressure feedwater heater
		Condenser performance
		Generator available capacity
		Turbine expansion line
4	Operation data	Operation data
5	Configuration	Fuel set up
		Data validation
		Input standard data
		Performance formula set up
		Input performance correction formula
		Pressure correction
		Leakage line graph
		Tube information
		Design data
Automatic report creating		

의 효율을 나타내는 서브모듈 각 1개씩 총 12개의 화면으로 구성되어 있다. 보일러 모델과 마찬가지로 한번의 클릭으로 실시간 성능값, 성능그래프, 성능 항목간 그래프 비교가 가능하다. 단위기 기별로 원하는 항목에 대해서 현재 및 과거 이력 에 대한 데이터를 얻을 수도 있다.

① 열정산 서브모듈

열정산 서브모듈은 터빈 사이클 내에서의 운전

정보 및 복·급수 및 주증기 계통의 물성치를 보여주는 화면으로써 복수기, 급수가열기, 보일러 및 터빈계통 전후의 온도, 압력, 유량 및 엔탈피 (enthalpy)의 열(heat)과 물질(mass) 정산결과 를 표현하였다.

② 터빈 내부효율 서브모듈

터빈 내부효율은 고압터빈, 중압터빈, 저압터빈 및 중압터빈과 저압터빈을 합친 재열터빈으로 구



분하여 계산하였으며, 저압터빈과 재열터빈의 경우는 단일 열낙차를 유효 사용에너지 종단 엔탈피(UEEP : Used Energy End Point)와 팽창선 종단 엔탈피(ELEP : Expansion Line Energy End Point)의 2가지 경우로 나누어 실시간으로 표시되도록 하였다.

### ③ 터빈 단 압력비 서브모듈

터빈 단 압력비(Turbine stage pressure ratio) 서브모듈은 터빈 내부의 압력 팽창 상태를 보다 세분화하여 추기 증기조건을 이용해서 압력강하비를 구하여 터빈내부의 압력의 변화 상태를 관리하기 위한 화면이다.

### 2.1.3 장점

현재 발전소 정비체계는 기존의 주기적인 정비 방식에서 기기 신뢰도에 기반한 신뢰도 기반 정비방식으로 바뀌고 있다. 주기 성능시험은 이러한 정비방식의 변화에 맞추어 성능시험을 통해 기존의 성능측정에서 한 걸음 더 나아가 설비 상태진단을 과학적으로 할 수 있는 방법이다. 주기 성능시험을 통한 발전설비 상태 점검을 위해 POMMS 시스템을 구축하였으며 그 활용효과는 다음과 같다.

첫째, 현재 성능시험 결과의 활용이 미흡한 가장 큰 이유는 계측값의 신뢰성 부족에 따른 시험결과에 대한 불신이다. POMMS 시스템은 현장 계측 값의 신뢰성을 확보하는 데이터 검증(data validation) 기법의 개발로 신뢰성을 높였다. 둘째, 성능시험 계산 및 분석은 많은 지식과 경험을 필요로 하기 때문에 이를 사람이 직접 수행하는 경우 많은 오차가 발생할 수 있다. POMMS 활용 시 사람이 직접 분석 및 검증해야 할 부분이 많이 줄어들 것이다. 셋째, 모든 성능지표 및 성능시험 계산 결과의 전산화로 기준값과 이전 데이터의 순위은 비교로 단위 설비의 성능저하 트렌드를 쉽게 분석할 수 있다. 넷째, 이전까지 성능시험은

매우 어려운 작업으로 전문가가 아니면 시험의 수행, 계산, 결과 분석 업무 수행이 쉽지 않았으나 POMMS 시스템 개발로 보다 쉽게 성능시험의 수행 및 결과 확인이 가능해 졌다.

## 2.2 상태 진단

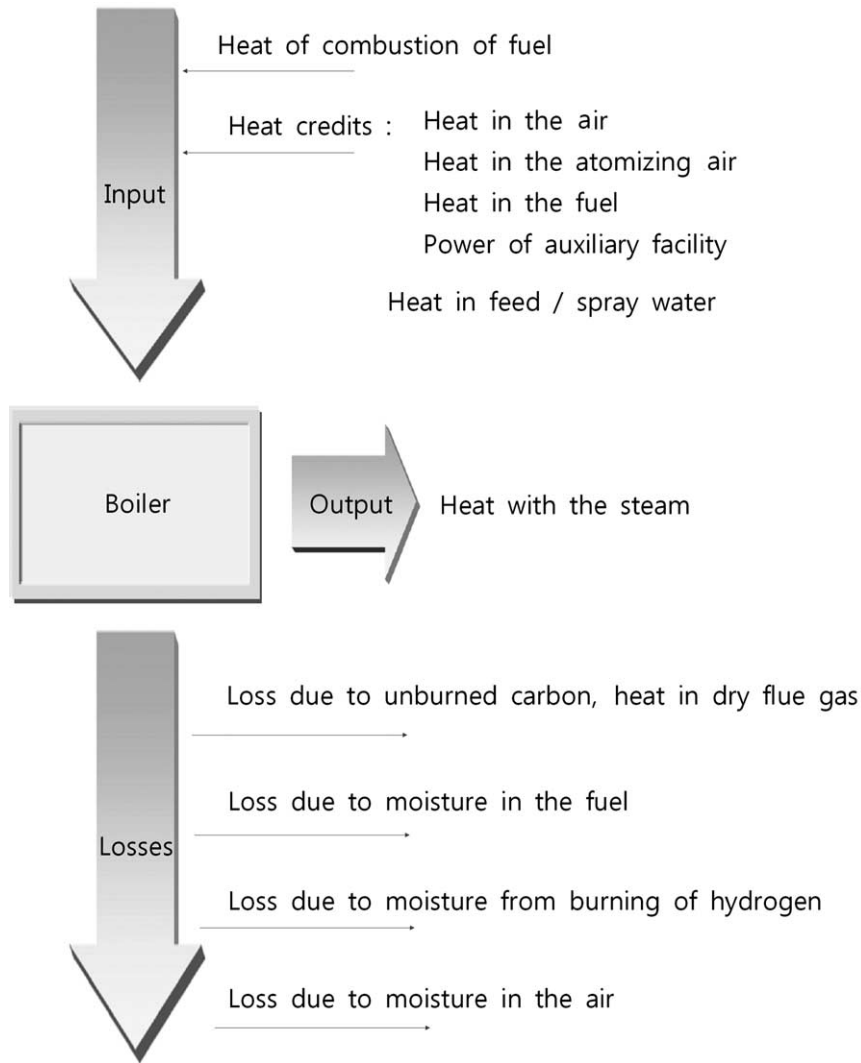
### 2.2.1 보일러 상태 진단

보일러 열성능 진단을 위한 시험은 보일러로 공급된 열의 분배상태등 열의 흐름을 분석하고 열의 효율성을 알기 위하여 열의 출입을 각 항목별로, 즉 연료의 연소에서부터 열의 흡수, 발생, 열손실등을 분석하여 열의 분포를 상세히 계산하는 것이다. 보일러 효율 계산은 미국기계학회 성능시험코드에 의거하여 열손실법(heat loss method)을 사용하여 보일러 총 입열 중 증기발생에 유효하게 사용되지 못한 열량, 즉 손실열량이 몇 %인가를 계산하는 것이다. 열손실법은 평가결과의 정확성으로 많이 사용되고 입출열법은 급수, 증기등의 계측기 오차 등의 영향으로 참고적으로 사용되는 것이 발전용 보일러의 일반적인 효율산출법 선정 원칙이다.

열손실법에 의한 효율은 기준상태에서의 에너지를 기준으로 손실을 산정하여 손실열량을 계산하고 효율을 산출한다. 외기상태를 에너지가 없는 상태로 규정하고 이 상태에서의 에너지상태를 에너지 레벨 '0'으로 보고 이때의 에너지와 보일러 경계를 통해 외부로 빠져나가는 에너지 차이로 열손실 정도를 평가한다. 모든 손실에 대하여 확인과 측정을 필요로 하고 측정 포인트는 손실계산에 필요한 연료의 고위발열량을 포함한 연료와 배기가스의 화학적 분석과 공기, 건가스의 중량, 온도 등이 포함되며 식 (1)로 보일러 효율  $\eta$ 의 계산식을 표시하였다.

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

여기서,  $L$ 은 열손실,  $H_f$ 는 연료의 고위발열량,  $B$



[그림 2] Boiler heat balance

는 부가 입열을 나타낸다.

그림 2에서는 보일러로 들어오는 입열, 보일러에서 나가는 출열 및 손실을 나타내었다. 성능분석은 입열에서 출열을 뺀 나머지 값을 손실로 계산하며 건배기 가스 손실, 미연탄소 손실, 연료 중 수분손실 등이며 계산되지 않은 손실 값은 불측정 손실로 처리한다. 이와 더불어 보일러 상태 진

단은 서론에서도 언급한 바와 같이 성능시험 결과 뿐 아니라 육안 검사, 재료의 성분 및 조직 검사, 비파괴 검사 등 다양한 진단이 병행되어야만이 상태진단시 만족한 결과를 얻을 수 있다. 아래에서는 보일러 상태진단을 위해 필수적인 3가지 주요 성능지표와 이를 통한 상태진단 방법을 설명하였다.





### 1) 열흡수율 계산을 통한 보일러 상태 진단

보일러 열흡수율은 연료를 연소하여 생긴 열량을 각 보일러 튜브에서 얼마나 흡수하였는지를 상대적으로 표현한 값이다. 열흡수율은 수냉벽, 과열기, 재열기, 공기에열기, 대류면 등으로 구분하여 계산하여 각 부위의 열전달이 정상적으로 이루어지는지 판별한다. 일반적으로 수냉벽, 과열기, 재열기 등 주로 복사를 통해 열전달이 이루어지는 부위가 전열면적에 비해 열흡수율이 높고 공기에열기, 대류전열면 등 대류를 통해 열전달이 이루어지는 부위는 열 흡수율이 낮은 특성이 있다. 보일러 열 흡수율은 보일러 전체 성능의 가장 중요한 척도이며, 보일러 입출구의 증기/연료의 유량, 온도, 발열량 값으로 계산하며, 보일러의 각 튜브에서의 열흡수율을 표시한다. 그 표현성능 지표는 과열기 열흡수율, 재열기 열흡수율, 수냉벽 열흡수율, 절탄기 열흡수율, 총 열흡수율로 표현된다. 보일러 열흡수율은 보일러의 연소상태, 제매장치 동작의 양부와 튜브내외면 스케일 생성을 판단할 수 있는 중요한 성능 지표이다. 절탄기 출구 가스온도의 증감, 과열기와 재열기의 가열저감수량 등과 함께 종합적인 판단으로 보일러 전열면의 상태를 파악할 수 있다.

### 2) 건배기 가스 손실 계산을 통한 보일러 상태 진단

건배기 가스의 열손실  $L_G$ 는 식(2)와 같다.

$$L_G = W_G C_{pG} \times (T_G - T_{ref}) \quad (2)$$

여기서,  $W_G$ 는 공기에열기 출구 건배기 가스량,  $C_{pG}$ 는 건배기가스의 평균 정압비열,  $T_G$ 는 공기에열기 출구 가스 온도,  $T_{ref}$ 는 기준 공기온도[°C]를 나타낸다. 성능시험 시 측정된 건배기 가스량은 보일러의 과잉공기량( $O_2$ ), 노내 공기누입, 공기에열기(airheater) 누설율, 연료특성등의 영향에 따라 증감이 발생하며, 배가스 온도는 보일러의

과잉공기량( $O_2$ ), 연소상태, 노내 전열면 오염, 공기에열기 온도효율의 영향을 주로 받는다. 이종 과잉공기는 건배기 가스량 증가 및 배기가스 온도 상승으로 나타난다. 연소용 공기량의 조절 등 연소방법 개선으로도 건배기 손실이 줄지 않으면 육안 점검 및 비파괴 검사 등 다른 상태점검 방법을 병행하여야 한다.

### 3) 미연탄소 손실 계산을 통한 보일러 상태 진단

미연탄소 열손실  $L_{uC}$ 는 식(3)과 같다.

$$L_{uC} = W_{dp} H_{dp} \quad (3)$$

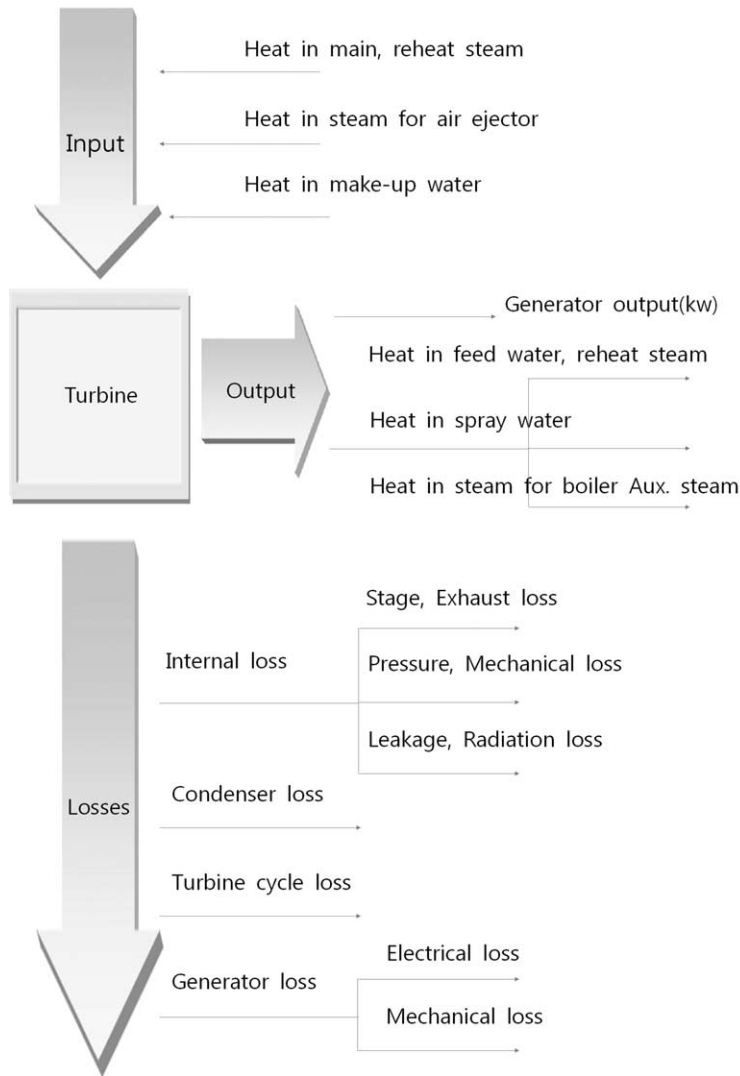
여기서,  $W_{dp}$ 는 연료 1 kg당의 총 비산먼지 발생량,  $H_{dp}$ 는 비산먼지의 발열량을 나타낸다.

보일러 미연탄소 손실은 회발분 중 고정탄소 비율을 나타내는 연료비, 회분 등 연료 자체의 영향도 크지만 연료의 분쇄성 지수, 화염, 작업용 공기 유량, 노내 체류시간 등을 판단할 수 있는 좋은 지표이다.

### 2.2.2 증기터빈 상태 진단

터빈 성능 진단을 위한 시험은 입·출력법을 원칙으로 한다. 그림 3에서는 터빈으로 들어오는 입열, 발전기 출력, 출열, 터빈 주요 손실을 나타내었다. 터빈효율은 발전기 출력 대 터빈 공급열의 비로 나타내며, 터빈 공급열은 주로 보일러에서 공급되는 증기의 보유열이며 출력은 터빈의 회전을 통한 발전기 출력 값으로 표현된다. 터빈에서의 주요 손실은 터빈 단락 내의 손실, 터빈 통과 후 복수기로의 배기 손실, 기계 손실 등의 터빈 내부 손실과 복수기 손실, 터빈 사이클 손실 등의 그 외의 손실로 구성된다.

터빈 성능분석을 통한 상태진단 시에는 터빈 내부효율 및 손실 값도 중요하지만 주급수 유량(feed water flow), 첫단 압력(first stage pressure), 추기 압력(extraction pressure) 등의



[그림 3] Turbine heat balance

증기터빈의 기본 특성을 나타내는 값이 상태진단의 아주 중요한 자료로 활용된다. 각각에 대해서는 아래에서 상세히 설명하였다.

1) 주급수 유량 측정을 통한 터빈 상태 진단

주급수 유량은 성능시험의 가장 중요한 측정요소이며 이 값에 따라 성능시험의 신뢰도가 좌우된다. 주급수 유량은 발전기 부하에 직선적으로

변화하며, 주어진 부하에 대해 주급수 유량 증가 시 터빈에 문제점이 있음을 시사한다. 주급수 유량 증가원인은 내부 씰의 마모, 증기 통로부 침식, 증기관의 드레인 밸브 패싱(passing), 계측오차 등이 있다.

2) 첫 단 압력측정을 통한 터빈 상태 진단

터빈 첫 단 압력이란 첫 단 하류측 압력, 제2단



상류측 압력으로 제2단 입구 압력을 의미하는 것으로 부하에 거의 직선적으로 변화한다. 즉 유량에 직접 비례한다. 따라서 주증기 유량은 일반적으로 첫 단 압력을 이용하여 결정한다. 첫 단 압력은 측정이 용이하고 측정 장치의 유지보수가 간단하며 재현성 반복성이 양호하고 성능저하가 없기 때문이다. 그러나 첫 단의 압력/유량 관계는 정확한 직선이 아니다. 왜냐하면 저부하시 터빈에서 이루어진 총 일량의 대부분은 첫 단에서 이루어지며 2단에 유입되는 온도와 압력은 정격부하시보다 낮아지기 때문이다. 이와 같은경향은 고압터빈의 모든 단락에 있어서 연속되며, 이 터빈의 후속 단락유량에 대해 3~5% 감소하는 편차를 갖는다. 재열 이후의 모든 터빈단락은 터빈의 최종 단락을 제외하고는 직선의 압력유량관계를 갖는다. 아래에서는 첫 단 압력비 증가 또는 감소시 설비 상태진단 방법에 대해 설명하였다.

#### ① 첫 단 압력비 증가시

첫단 하류측 압력 증가가 수반될 때는 노즐 블록 침식에 의한 주증기 유량 증가를 예측할 수 있고, 하류측 압력이 증가하지 않을 때는 첫 단 압력 측정점 하류측의 버킷 손상이나 오염에 의한 증기 통로의 유로 단면적 감소를 예상할 수 있다.

#### ② 첫 단 압력비 감소시

첫 단 압력비가 감소하였다면 고압터빈 하류측 내부 설의 과도한 간극이나 노즐 블럭 또는 증기 입구부의 흐름제한에 의해 터빈에 흐르는 유량이 감소되었다고 예상할 수 있다.

4) 엔탈피 강하효율 계산을 통한 터빈 상태 진단  
정격부하에서 보다 부분부하에서 고압터빈 내부 효율이 크게 저하되어 고압터빈 효율곡선 기울기가 기준치에 비해 변화가 발생되었다면 이것은 터빈 첫 단의 성능이 저하하고 있음을 시사한다. 터빈의 일반적인 전체 내부효율이 저하하였다면

이는 패킹 손상의 증가, 터빈 블레이드에 침전물 퇴적, 또는 블레이드 손상 때문이다. 이 중에서 증압터빈의 내부효율이 상승되는 것으로 계산되면 이는 N<sub>2</sub> 패킹 누설이 증가되었기 때문이다.

### 2.3 주기 성능시험의 기대효과

주기 성능시험은 기존의 성능측정에서 한 걸음 더 나아가 설비 상태진단을 과학적으로 할 수 있는 방법이다. 이를 통해 기존 시간주기 계획예방정비에서 신뢰도 기반 계획예방정비 주기 설정으로 주기를 연장할 수 있으며 발전소 원가 및 조직의 효율적 운용으로 제작사 권고사항에 의존하는 기존의 예방정비 프로그램에서 탈피하여 최적 정비를 위한 체계적이고 과학적인 자료 제공으로 고도의 발전소 이용률을 유지할 수 있다. 기존 계획예방정비주기를 10%만 연장할 때 전력판매 금액을 계산해 보면 '09년 당진화력 계획예방정비 기간 234일, 일일 전력거래 수익금 2.3억원으로 계산시 53.82억원이다. 또한 주기성능시험을 통한 발전설비 상태진단을 통하여 고장에 의한 불시정지 감소와 정비를 위한 발전 정비기간 감소를 기대할 수 있다. 고장건수를 10%만 감소시킬 때 손실 절감액을 계산해 보면 '09년 당진화력 고장 정지일수 9일, 일일 전력거래 수익금 2.3억원으로 계산시 2.07억원의 원가절감을 기대할 수 있다.

### 3. 결론

본 고에서는 현행 계획예방정비 운영방식의 문제점을 분석하고 신뢰도 기반 정비시대의 도래에 따라 상태진단을 위한 주기성능시험에는 아래와 같은 내용이 포함되어야 한다는 결론을 얻었다.

- 1) 우리나라의 4계절이 뚜렷한 기후 특성 때문에 성능시험 결과의 편차가 크므로 각 발전소 별로 매년 일정한 시기(발전소 준공시기)를 정한다.



- 2) 성능시험의 신뢰도 향상을 위하여 계측기 정확도의 일관성을 유지하기 위해 투자효율성을 고려한 측정항목별 계측기 정확도 기준을 정한다.
- 3) 성능계산에 있어 중요한 입력변수 들이 정상값을 유지하기 위한 데이터 검증(validation)을 한다.
- 4) 주기 성능시험 결과를 체계적으로 관리하여 설계치, 기준치 및 이전 시험치와 비교분석을 한다.
- 5) 발전설비 상태 점검의 중요한 지표들을 추출하여 이 성능지표를 활용하여 발전설비의 상태진단을 한다. (KIPEC)