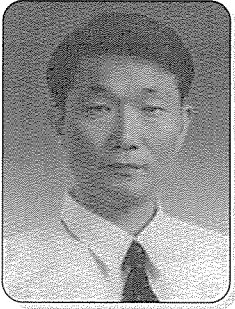


# 열병합발전의 일반 실무(II - II)



(주)태협엔지니어링  
 발송배전, 전기응용, 건축전기  
 설비 기술사  
 이사 김미승  
 Tel : (02)2613-8183

## 제4장 보일러

### 1. 개요

보일러를 구조에 따라 구분하면 원통식보일러와 수관식 보일러로 대별 할 수 있으며 특수보일러를 첨가하여 분류 할 수 있다.

#### ○ 원통보일러

원통보일러를 설치방식에 따라 분류하면 입형보일러와 횡형보일러로 구분하나, 일반적으로 본체의 구조에 따라 분류하면 원통(노통)보일러,연관보일러 및 혼식보일러로 분류한다.

##### - 노통 보일러

원통보일러는 가장 구식의 보일러로서 연소가스가 노통내를 통과하고 다시 보일러통 양 측면을 가열하여 굴뚝으로 배기되는 형식으로 노통이 1개인 것을 comish 보일러와 두 개인 것을 lancashire보일러라 한다.

##### - 연관 보일러(smoke tube boiler)

보일러통 안에 다수의 가는 연관(smoke tube)을 장치하여 그 속에 연소가스를 통하게 한 비교적 소형의 보일러를 말한다.

##### - 혼식 보일러

노통보일러와 연관보일러를 조합하여 서로의 장점을 이용한 것으로 케와니보일러, 기관차보일러, 선박용 보일러 등이 있다.

#### ○ 특수보일러

주철제 보일러, 특수 유체 보일러, 폐열회수보일러 및 원자력 보일러가 여기에 속하며

##### - 주철제 보일러

주철제보일러에는 증기를 발생치않고 난방용의 고온의 물을 만드는 온수용과 극히 저압(0.3 ~ 0.7[atg])으로 난방에만 널리 쓰이는 증기용 보일러가 있다.

##### - 수은 보일러(특수 보일러)

수은증기와 수증기를 병용하는 2유체 사이클용 설비에서 수은의 포화압력과 비중량이 큰 점을 이용한 보일러를 말한다.

여기서는 수관식 보일러와 폐열회수보일러(배열회수보일러)에 대하여 서술한다.

### 가. 수관식 보일러의 형식

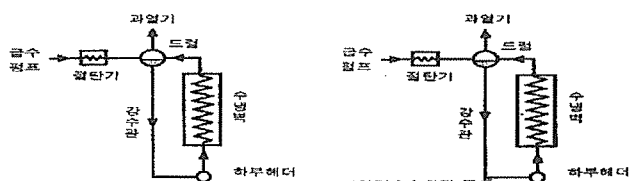
발전용 보일러는 일반적으로 대형 수관식 보일러로서 형식은 조건별로 다음과같이 분류 할 수 있다.

#### (1) 사용압력에 의한 구분

임계점을 기준으로 그 미만에서 운용되는 아 임계압 보일러와 임계점을 초과해서 사용되는 초임계압 보일러로 구분되며, 한국전력 보령 # 3 ~ 6호기부터 초임계압 관류형 보일러가 채용됨

#### (2) 순환 형식에 의한 구분

드럼형의 순환보일러(자연순환형, 강제순환형)과 관류보일러로 구분되며, 관류보일러에서는 아임계압과 초 임계압 모두 가능하다.



(a)자연순환보일러

(b)강제순환보일러

#### (3) 사용연료에 의한 구분

석탄연소 보일러와 중유 및 가스연소 보일러로 구분

(4) 연소방식에 의한 구분

저휘발분(무연탄)의 연료에 사용되는 수직연소식, 기름 및 가스와 유연탄과 같이 고휘발분 연료에 사용되는 수평연소식, 그리고 수평연소식으로서 연소실내의 열분포를 균일하게 할 수 있는 코너연소식(접선연소식)으로 구분된다.

(5) 전열면 배치에 의한 구분

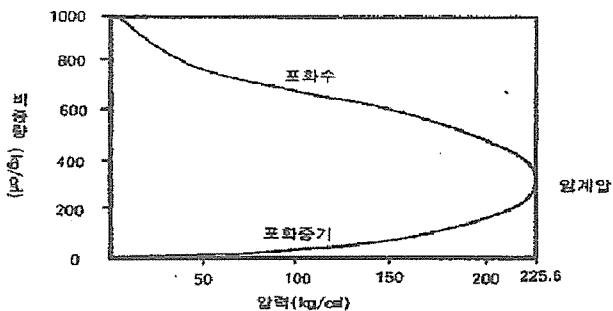
back pass 부위(후부 가스통로)의 전열면 배치유무에 따라 one pass식과 two pass식으로 구분되며 주로 2경로식이 채택됨(절탄기,과열기,재열기, 집진기 설치 필요)

나. 순환 형식에 의한 보일러 종류

순환형식에 의한 보일러로서는 드럼형의 순환보일러 즉 자연순환형과 강제순환형으로 나누어지고, 관류형 보일러는 벤슨보일러와 술쳐보일러로 구분되는데 보일러효율은 압력과 온도가 높을수록 향상이 되고 그러나 사용온도는 보일러 튜브등에 제한을 받으므로 현재로는 발전용 보일러는 초임계압으로 나아가는 추세이다.

(1) 자연순환 과 강제순환 보일러 비교

보일러수의 순환은 수냉벽 속의 기수(포화증기와 포화수)혼합물의 밀도와 강수관으로 흐르는 물의 밀도차에 의해서 이루어지는데, 보일러의 사용압력이 증가하면 물의 물리적 성질에 의하여 포화수의 밀도는 감소하고 포화증기의 밀도는 증가한다. 이로서 사용압력이 높은 보일러수의 순환력을 보강하기 위하여 보일러수 순환펌프(bwcp)를 설치한 것을 강제순환 보일러라 한다.



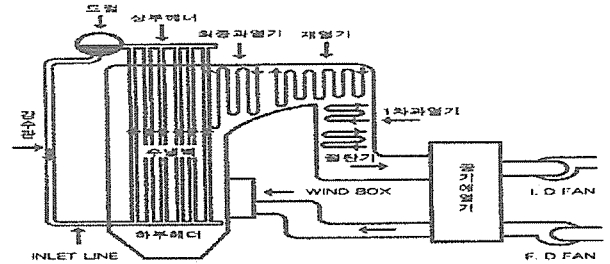
포화수와 포화증기의 변화

(2) 자연순환 보일러 개요

급수는 절탄기를 거쳐 드럼으로 유입된다. 절탄기에서 유입된 급수와 드럼에서 기수 분리된 포화수는 강수관,하부헤더를 거쳐 수냉벽에서 노 내부의 복사

열을 흡수한다.

보일러수의 순환은 수냉벽 속의 기수(포화증기와 포화수)혼합물의 밀도와 강수관으로 흐르는 물의 밀도차에 의해서 이루어진다. 순환력에 영향을 미치는 요인으로는 열 흡수량,보일러의 높이,사용압력 증가를 들 수 있다.



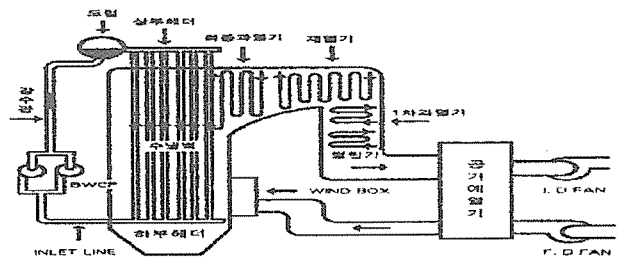
자연순환보일러

(3) 강제순환 보일러

강제순환보일러는 보일러수를 순환시키기 위하여 보일러수 순환펌프를 사용한다. 강수관에 설치된 순환펌프는 드럼에 저장된 물을 흡입하여 하부헤더 및 수냉벽을 거쳐 드럼으로 강제순환시킨다. 강제순환보일러는 자연순환보일러보다 순환력이 좋으므로 보일러의 크기가 같은 경우 더 많은 증기를 생산 할 수 있다.

순환력을 자연순환력에 보일러수 순환펌프의 순환력을 더한 것으로 그 장점으로는 사용압력이 증가해도 충분한 순환력을 얻을 수 있으며, 보일러수의 순환이 원활하여 증발관이 과열될 염려가 적다.

튜브직경이 작아 내압강도가 크므로 튜브 두께가 얇아져 열전달율이 좋아지고, 보일러 보유수량이 적어 기동,정지시간이 단축되고 정지시 열손실이 감소한다.

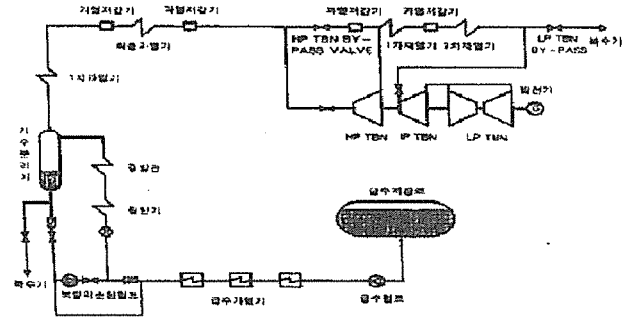


강제순환보일러

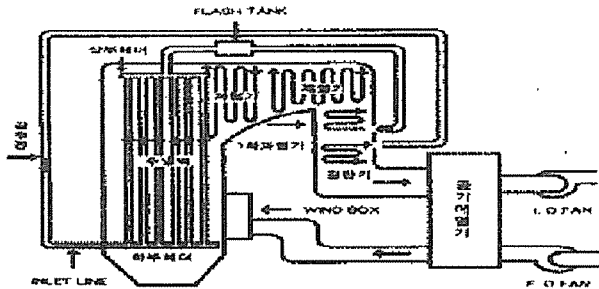
(4) 관류보일러

관류보일러는 급수펌프가 보일러수를 순환시키며 정상운전시 물과 증기의 관리가 불필요하므로 초 임계압 보일러는 반드시 관류보일러를 사용한다. 관류보일러의 특징은 직경이 작은 튜브가 사용되므로 증량이 가볍고, 내압강도가 크나, 압력손실이 증대되어 급

수펌프의 동력손실이 많다. 더불어 보일러 보유수량이 적어 기동시간이 빠르고 부하추종이 양호하나 고도의 제어기술과 각종 보호장치가 필요하다. 단점으로는 운전중 보일러수에 포함된 고형물이나 염분 배출을 위한 블로우 다운(blow down)이 불가능하여 보충수량은 적으나 수질관리를 철저히 하여야 한다. 노 하부 수냉벽은 나선형(spiral type)으로 설치되고 버너부근의 고열을 흡수하는 수관은 ribbed tube를 사용한다.



솔처보일러

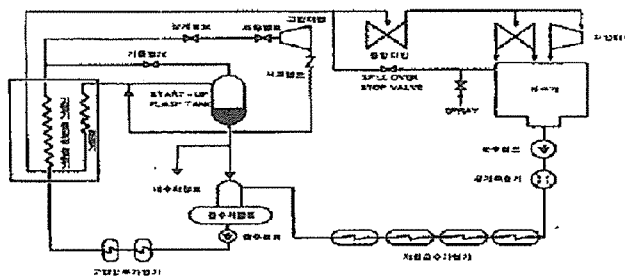


관류보일러

(가)벤슨 보일러

과열기 출구에 기동용 flash tank가 설치되어 있다. 보일러 기동시 과열기까지 순환한 물은 기동용 flash tank를 거쳐 배수저장조 혹은 급수저장조로 회수된다.

벤슨 보일러 특징은 증발관에서 유동안정을 위하여 최소 급수량은 정격 급수량의 약 30%이상 유지되어야 하고, 단시간 정지후 재기동시 열 손실과 시간손실이 많고 bottle-up이 불필요하다.



벤슨 보일러

(나) 솔처보일러(sulzer boiler)

증발관 출구에 설치된 기수분리기가 기동 및 정지 그리고 저부하시 기수혼합물을 분리시키며, 정상운전시는 보일러수가 증발관에서 모두 증기로 변하므로 기수분리의 필요성이 없다. 기수분리기 하부에 설치된 순환펌프는 포화수를 절단기 입구로 재순환시킨다.

그리고 기동시 과열기로 물이 순환되지않으므로 기동이 빠르고, 보일러 기동시간이 단축되고 열 손실이 감소된다.

다. 배열회수(排熱回收)boiler  
 배열회수보일러는 복합발전 plant에 있어서의 gas 추 발전과 증기추 발전을 연결하는 점에 위치하여 Gas Turbine 배가스의 열에너지를 증기의 열에너지로 변환시키는 중요한 기기이다.

(1) 배열회수보일러의 종류

배열회수보일러의 형식에는 助燃形과 非助燃形으로 구분되고,증기의 사용압력에 따라 單壓과 複壓으로 구분된다.

(가) 조연장치 유무에 따른 분류

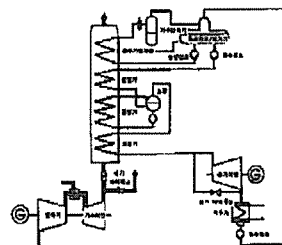
최근에는 gas turbine 고온화 기술의 발달에 따라, 배열회수보일러의 열원이 되는 가스터빈 배기가스도 고온화의 경향이 있어 최근에는 조연장치를 갖지않는 배열회수형이 일반적으로 사용되고 있다.

- ①助燃形:배기가스중 공기를 이용 추가 연소하는 보일러
- ②非助燃形:배기가스로만을 이용하는 보일러

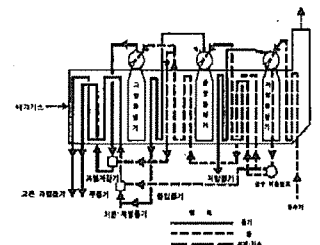
(나) 증기사용압력에 따른 분류

배열에너지의 유효회수를 목적으로, 사용증기의 종류로서 구분된다.

- ①單壓形:단일의 압력레벨(고압)의 주증기계통을 갖는 보일러를 말한다.
- ②複壓形:두 개의 압력레벨을 갖음으로 플랜트 효율이 좋아진다.



배열회수보일러 단압설비

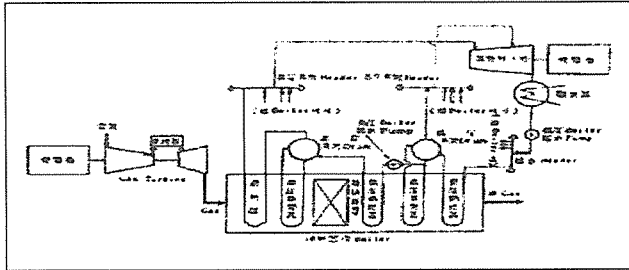


배열회수보일러-3압설비

(2) 배열회수보일러의 구조

배열회수보일러의 구조로는 강제순환보일러와 자연순환보일러와 같이 드럼을 가지고 있고, 배기가스는 복합식의 경우 과열기→고압제2증발기→脫硝裝置→고압제1증발기→고압절탄기→저압증발기→저압절탄기를 거쳐 배기된다.

(3) 다축형 복합발전PLANT 실례(복합식 자연순환형 보일러의 예)



라. 보일러의 일반적 구조

보일러를 사용하여 증기를 발생하기 위하여는 보일러의 본체설비와 열교환기(절탄기, 공기예열기), 연소설비, 통풍설비(F/D FAN, I/D FAN), 급수설비(급수펌프 등), 탱크류(급수탱크, 연료 탱크) 등 여러 가지 설비가 복합되어 계통운전되고 있다.

여기서는 보일러의 형식에 따라 조금씩 다르지만 일반적인 보일러 본체설비에 대하여 열거하면 다음과 같다.

(1) 화로 및 전열면

보일러의 화로(연소실)는 연소장치에 의해 보내진 연료와 연소용 공기를 잘 혼합하여 연료가 갖고있는 화학적 에너지를 열에너지로 변환시키는 장소이다.

노의 크기는 보일러의 형식, 연료의 종류, 연소방식, 통풍방식, 노벽의 구조 등에 따라 다르나 일반적인 사항으로는

- 국부적인 고 열부하를 피할 것
- 항상 안정된 재료의 허용 온도를 유지할 수 있는 것
- 연료를 완전연소 시킬 수단과 공간 유무
- 화로 출구가스 온도 적정유무
- 열팽창으로부터 구속개소 여부

등을 말 할 수 있는데 가장 주의할 점은 화로 수냉벽의 열응력과 그 지지물의 열팽창차이에 대한 문제이다.

전열면은 일반적으로 열흡수량을 많이 필요로 하는 순서로 복사영역으로부터 대류영역으로 배열하므로 많은 증발열을 필요로 하는 증발관을 연소실벽에 수냉벽으로 형성시켜 전열량 중 가장 많은 복사열을

흡수하게하며 나머지 전열면에서 여열이 균일하게 흡수되게 한다.

(2) 튜브

회부착 및 마모에 대한 문제가 없는 중유 및 가스연소 보일러 전열면의 열소자 간의 간격은 석탄연소 보일러의 열소자 간의 간격보다 좁게 배열되며, 석탄연소 보일러의 경우 연소가스의 고온부에 설치된 수직형 복사과열기에서는 복사열량을 효율적으로 흡수하고 금속 온도를 낮추고 회부착을 완화하기 위하여 판형을 쓰며 가스유동과 직각방향의 튜브간격을 크게 배열한다.

(3) 드럼

보일러수와 증기의 순환경로를 구성하고, 관류보일러 경우에는 드럼이 없다

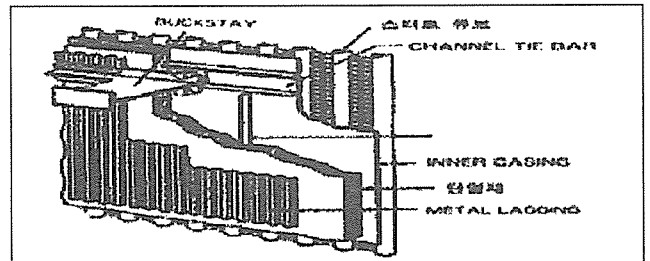
(4) 과열기 및 재열기

드럼에서 분리된 포화증기를 가열하여 온도가 높은 과열증기를 만든다

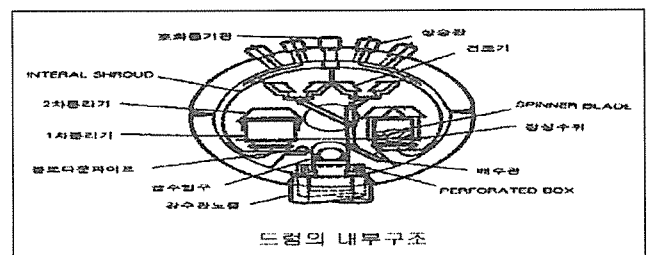
2. 노 (furnace)

노는 연료와 연소용 공기가 혼합되어 연료의 가연성분이 연소되는 공간이며 보일러수가 노 벽을 구성하는 수냉벽 내부로 흐르면서 연료의 연소열을 흡수하여 증기로 변한다..

노의 수냉벽은 연소가스의 누출이나 공기의 누입이 없도록 전용접 수냉벽 방식을 많이 채택한다.



3. 드럼(Drum)



드럼의 기능으로서는 ①보일러수와 증기의 순환경로를 구성한다. ②증발관에서 유입되는 기수 혼합물

을 분리한다. ③보일러수를 저장한다. ④드럼내부의 고형물질을 배출한다.

### 가. 드럼의 구성요소

#### (1) 급수관(feed water pipe)

급수관은 절탄기에서 여열된 급수를 드럼으로 공급한다. 급수관은 급수를 균등하게 공급하기 위해서 드럼의 길이 방향으로 설치되어 있으며, 작은 구멍들이 뚫어져 있다.

#### (2) 강수관(down comer)

강수관은 드럼하부에 설치되어 하부헤더와 연결되어 있으며 순환력을 크게 하기위하여 노 외부의 비가열부분에 설치한다.

#### (3) 상승관(riser tube)

상승관은 수냉벽 출구에 설치되어 기수혼합물을 드럼으로 공급하는 관으로 드럼상부로 연결된다.

#### (4) 격판(shroud,baffle)

격판은 상승관의 기수혼합물을 드럼의 내면으로 안내하여 드럼을 균일하게 가열하므로 열응력 발생을 억제한다.

#### (5) 원심분리기(cyclone separator)

원심분리기는 기수 혼합물을 선회시켜 물은 원심력에 의해 밖으로 밀려 원통주위를 회전하면서 아래로 떨어지고 증기는 상부로 올라가 과열기로 흐른다.

#### (6) 건조기(dryer)

건조기는 포화증기 속에 함유된 습분을 제거하기 위해서 주름진 철판을 여러겹 겹쳐 드럼 상부 증기통로에 설치한다. 수분이 포함된 포화증기가 건조기를 통과할 때 증기의 흐름방향이 변화하면서 물은 철판에 부딪쳐 드럼으로 떨어진다.

#### (7) 포화증기관(saturation steam pipe)

포화증기관은 드럼과 과열기 입구헤더를 연결하는 관으로서 드럼에서 나온 증기를 과열기로 흐르게한다.

#### (8) 수위계

수위가 쉽게 인식되기 위해서 수부와 증기부가 청색과 적색의 two color로 표시되는 수면계가 많이 사용된다. 고온 고압의 물과 증기에 사용되는 드럼수위계는 취급에 주의를 하지 않으면 열충격으로 파손되는 경우가 있다.

#### (9) 기 타

- 블로우 다운 파이프(blow down pipe)
- 안전 밸브(safety valve)
- 벤트 파이프(vent pipe)

### 나. 드럼 수위 조절

드럼의 수위기준은 기수분리기 하단이며 드럼의 수위가 상승하면 기수분리기가 물속에 잠겨 기수분리가 어려워진다. 드럼의 정상수위는 "0"으로 표시하는데 정상수위"0"는 드럼의 중심점보다 약간 낮다.

#### (1) 수위이상시의 문제점

##### - 고수위시

수위가 높아지면 기수가 분리 되지않아 증기가 다량의 수분을 함유하여 과열기로 흐르며 과열기 내부에서 스케일이 생성되어 과열기가 과열될 우려가 있다.

과열기나 터빈에 보일러수가 유입되면 다음과같은 현상이 발생한다.

- 터빈 케이싱과 로타의 팽창차가 급변한다.
- 터빈 침식 및 진동이 발생한다.

##### - 저수위시

드럼수위가 너무 낮게되면 일부 수관은 물 부족현상이 발생 할 수 있어 과열될 우려가 있다.

#### (2) 수위변화의 요인

- 터빈부하 급격히 변화 할 경우
- 연료량이 급격히 변화 할 경우
- 드럼 압력이 급격히 변화 할 경우
- 보일러 튜브가 과열된 경우
- 드럼 수위 검출 및 전송 계통이 고장난 경우

#### (3) 수위 제어

보일러 드럼수위는 드럼수위와 증기량 및 급수량 3요소 제어방식이 채택된다.

## 4. 튜브

### 가. 최소 필요두께

Boiler 튜브의 설계에서 많이 적용되고 있는 "ASME Section I"을 기준으로 ASME Section I PG-27.2.1에 명시된 두께계산식에서 외경이 5 inch 이하인 튜브의 설계두께는 Midwall Temperature에서 내압과 허용응력을 적용하여 최소 필요두께를 계산하고 있다.

그러나 이러한 설계두께는 운전시간,운전조건,하중 및 온도변화에 대한 재료의 설계수명을 보증하기 위

해 고려되어야 할 반복하중, 열응력, 온도구배 등에 관한 구체적인 보증이 없기 때문에 “ASME Section I”의 최소요구조건을 만족한다고 해도 실제 설계구명을 보증하기는 어렵다.

보일러 튜브의 사용 가능한 최소 필요두께는 운전되는 Midwall Temp와 허용응력에서 계산되며

$$T = \frac{PD}{2S + P} + 0.005D + \epsilon$$

## 나. 튜브의 사고경향

### (1) 손상튜브의 파열형태

#### (가) 파열

##### ① 과열

- 내면에 두꺼운 스케일
- 스케일의 박리 퇴적
- 물과 증기의 유량 불균일
- 연소가스의 편류
- 재질선정 불량
- 운전 오조작

##### ② 강도부족

- 부식에 의한 두께감소
- EROSION에 의한 두께감소
- 재질열화
- 열처리 부족(스테인레스 강)
- 설계불량에 의한 강도부족
- 제작, 조립불량

#### (나) 균열

##### ① 피로파괴

- 온도변화에 의한 반복응력
- 진동
- 열팽창 수축에 의한 구속력의 반복

##### ② 부식피로

- 운전중의 열응력
- 부식인자

##### ③ 부식마모

- 고온산화: 내산화 한계온도 이하에서 사용
- ash cutting : 석탄회에 의한 Erosion으로 두께감소
- 고온부식: 중유회에 의한 Vanadium Attack, Alkali유산염에 의한 부식
- 저온부식: 저온부에서 유산 노점에 의한 부식
- 수증기 산화: 수증기에 의한 산화스케일의 생

## 성과 박리

- 응력부식: 스테인레스강의 잔류응력과 염소이온에 의한 부식균열
- 산소 및 수소 부식: 용존산소에 의한 부식과 부식물중 수소에 의한 입계 void 발생
- Alkali 부식: 부식 퇴적물에서 NaOH에 의한 부식

### (2) 부식과 산화 및 마모

보일러에서 발생하는 각종 부식은 경년열화의 한 유형으로 주로 고온부에서 주로 발생하는 열화현상을 기준으로 금속재료가 고온의 연소가스와 같은 부식성 분위기에서 화학적 또는 전기·화학적 반응이 일어나는 부식과 산소와의 결합으로 반응하는 산화로 나누어지고, 물리적인 원인으로 금속이 마모하는 경우에는 부식이라고 하지않고 그 원인에 따라서 침식(Erosion), 마모(Wear)등으로 부른다.

#### (가) 고온산화

산화와 스케일의 박리는 Cr이나 Ni함유량이 많을수록 내박리성이 뛰어나며, 보일러 튜브방지 대책으로는

- 고 Cr강의 이용 또는 Cr도금 처리 (경제적인 부담을 고려해야 함)
- 강종으로는 sus 304, 316, 321 또는 sus 347(303,316,321보다 내산화성이 큼)
- 한번 박리한 외층 스케일의 재생속도는 극히 완만하므로 충격이나 air blowing등 적극적 방법으로 외층 스케일을 제거하여야 한다.
- 튜브의 내면처리로서 통상 사용되는 산세정보다는 그라인더 연마나 short blaster 가공
- 결정입을 미세화하면 스케일 생성은 억제되나 creep 강도저하를 고려해야 함

#### (나) 고온 연소가스에 의한 부식

보일러의 과재열기관 등의 고온의 전열면이 고온의 연소가스나 ash에 의해서 부식을 일으키는 현상을 말한다.

원인으로는 연료중에 함유된 Na, V, S 등 불순물이 저융점의 oil ash(유회)가 되며 고온부식에 의한 방지법으로는 고용점 화합물을 연료중 또는 노내에 주입하여 유회의 융점을 높여 부식반응을 완화한다.

첨가재료로는 SiO<sub>2</sub>, Mg, Ca, Al 등의 화합물이 있다. 주로 Mg 화합물을 주로 사용

#### (다) 저온 연소가스에 의한 부식

연료중에 포함되어 있는 유황분이 연소되어 가스

로 변화하였다가 금속 표면온도가 노점이하로된 지역에서 응축하여 금속을 부식시키는 현상을 말하며, 이에 대한 적절한 대책으로는,

- 유황분이 적은 연료사용
- 저 과잉공기율 운전

과잉 공기율을 적게 할수록 SO<sub>3</sub>의 생성 방지

- 배기가스 온도의 조정

공기 예열기의 금속표면온도를 높여 연소 배기가스를 노점이상의 온도로 배출을 위하여 보일러 기동시나 저부하 운전시 찬공기를 by-pass 할 수 있도록 회로 구성. 그러나 배기가스 온도조정문제는 열효율 및 공해문제가 관련 될 수 있으므로 주의를 요한다.

- 첨가제 사용

SO<sub>3</sub>증기를 중화시켜 농도를 낮추고 부식을 적게 하기 위하여 Dolomit나 탄산마그네슘, 마그네시아 등의 powder를 증유 또는 연소가스에 첨가하거나 값싼 암모니아 개스를 공기예열기 직전에서 200℃ ~350℃ 정도의 연소가스에 붙여넣는 것도 효과가 있다.

- 수세시에 세정수가 보일러의 고온부에 유입 농축되는 일이 없도록 주위한다.
- 냉단 평균온도를 노점온도보다 높게 유지시킨다.

$$\text{냉단평균온도} = \frac{\text{입구공기온도} + \text{출구가스온도}}{2}$$

- 가열소자 재질은 내식성 합금강을 사용한다.

## 5. 과열기(superheater)

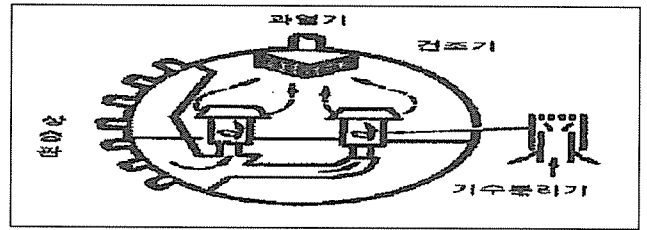
과열기는 드럼에서 분리된 포화증기를 가열하여 온도가 높은 과열증기를 만드는 목적으로 과열증기를 사용하므로 터빈에서 열낙차가 증가하고, 터빈의 내부효율이 증가한다.

터빈과 증기공급관의 마찰손실이 적어지고, 습분에 의한 침식이 경감된다. 재열기는 고압터빈에서 일어난 온도가 떨어진 증기를 다시 가열하여 과열도를 높이는 장치이다.

### 가. 과열기의 형식

전열 방식에 따라 복사과열기와 대류과열기 및 대류-복사과열기등으로 분류되고, 유동방식에 따라서는 연소가스의 흐름방향과 증기의 흐름방향이 일치되어 연소가스의 고온부와 증기의 저온부가 접촉하는 병류식과 연소가스의 흐름방향과 증기의 흐름방향이 반대이며 연소가스의 고온부와 증기의 고온부가 접촉되는

향류식 및 혼류식이 있다.



기수분리기와 건조기

### 나. 증기온도 조절

#### (1) 증기온도 변화요인

- 증기온도가 떨어지는 요인

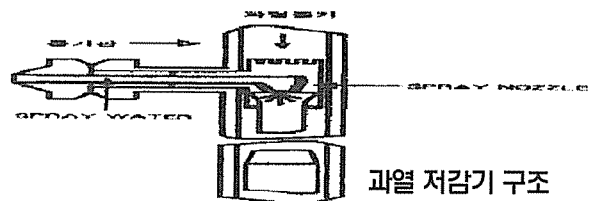
- 과잉공기가 부족한 경우
- 급수온도가 기준온도보다 높은 경우
- 과열저감기가 누설되는 경우
- 석탄회가 과열기 및 재열기 표면에 부착된 경우

- 증기온도가 올라가는 요인

- 과잉공기가 많은 경우
- 급수온도가 기준온도가 낮은 경우
- 재열기 입구온도가 기준온도보다 높은 경우
- 석탄회가 수관표면에 부착된 경우
- 연소 시간이 길어지는 경우

#### (2) 증기온도 조절방법

##### (가) 과열저감기



과열 저감기 구조

과열저감기는 과열증기 통로에 설치되어 분사노즐에서 물을 분사시켜 증기온도를 내린다. 이 방법은 증기온도를 내리는 방법중 가장 보편화된 방법이며 증기온도의 조절범위가 넓고 시간이 빠르다.

분사수가 증기와 직접 혼합하므로 과열기 및 터빈에 부착되는 스케일을 방지하기 위하여 분사수의 순도가 좋아야 한다.

##### (나) 화염의 위치 조정

미국 C.E 사(COMBUSTION ENGINEERING)의 경사각 조절 버너(Tilting Burner)는 노의 네모통이에 설치되어 상하 30°의 각도로 조절 할 수 있어 버너 분사각이 상방향(+30°)이면 증기온도가 올라가고 하방

향(-30°)이면 증기온도가 떨어진다

그래서 버너의 분사각으로 증기온도를 조절 할 수 있다.

### (다) 가스 재순환

가스 재순환 송풍기가 절탄기를 통과한 연소가스의 일부를 노 하부로 공급하여 전열면에서 흡수열량을 변화시킨다. 재순환 가스량이 증가하면 증기온도가 올라가고 감소하면 증기온도가 떨어진다.

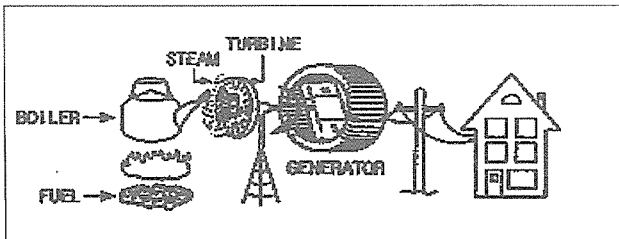
## 제5장 증기 터빈

### 1. 개요

#### 가. 증기터빈의 작동원리

터빈이란 증기, 가스와 같은 압축성 유체의 흐름을 이용하여 충동력 또는 반동력으로 회전력을 얻는 기계장치라 말할 수 있고,

여기서 증기터빈이란 보일러에서 물을 증기로 바뀐 열에너지를 열낙차를 이용하여 기계적 에너지로 변환시키는 장치를 말하고, 동일 축에 연결된 발전기는 터빈에서 변환된 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환시키는 기계장치를 증기터빈 발전이라 한다.



증기터빈의 원리

위 그림과같이 제1단 노즐에서 분출된 증기는 회전 날개에 부딪혀 일을 한 후 에너지의 일부를 잃고, 제2단은 약간 낮은 압력으로 터빈 로타(rotar)를 돌리며, 제3단에서도 동일한 방법으로 증기가 통과하므로 증기의 모든 에너지는 터빈로타에 전달한 후 배기증기로서 터빈을 떠난다.

#### 나. 증기터빈의 분류

##### (1) 출구증기의 상태에 의한 분류

###### ① 복수 터빈(condensing turbine)

터빈을 통과한 증기를 물로 응축시키기 위하여 터빈의 출구측에 복수기(condenser)를 설치한 형식의 터빈을 말한다.

###### ② 배압 터빈

보일러에서 발생한 고온 고압의 증기가 터빈에 공급되어 터빈의 각 단에서 팽창하면서 그 열낙차로 전력을 생산하고, 터빈에서 배출되는 저압증기를 공정용에 사용하는 방식을 말한다.

##### (2) rotar 배치에 의한 분류

① 직렬형(tandem compound arrangement t.c) 터빈  
1개 이상의 터빈로타가 직선으로 이어져 있고 이로 1개의 발전기를 돌리는 방식을 말한다.

② 병렬형(cross compound arrangement, c.c) 터빈  
1개 이상의 터빈로타가 2열로 배치되어있고 2개의 발전기를 돌리는 방식을 말한다.

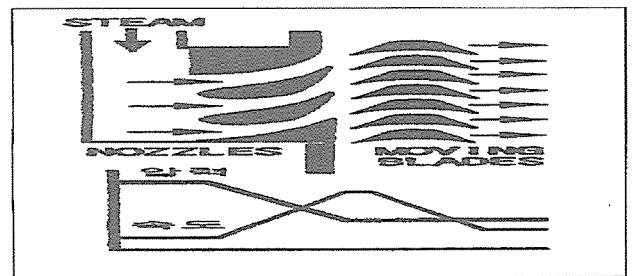
이 방식은 정격속도를 2종류를 할 수 있고 저압터빈에서 연결된 발전기는 4극기를 채용하므로 최종단 날개를 크게 할 수 있어 대용량화(1000MW이상)가 가능하다.

##### (3) 증기 팽창에 의한 분류

###### ① 충동터빈(IMPULSE TURBINE)

증기가 노즐에서만 팽창하여 압력은 낮아지고 속도는 증가되며, 회전날개에서는 압력은 일정하고(팽창하지 않는 의미임) 속도만 감소된다.

주요 특징으로는 단면이 좌우대칭인 회전을 사용하고 회전날개 전,후의 압력차이가 없어 축추력이 발생치 않는다. 저부하시 노즐 조속이 가능하므로 교축 손실이 적다. 종류로는 단단터빈, 속도 복식터빈, 압력 복식터빈등이 있다.



충동터빈

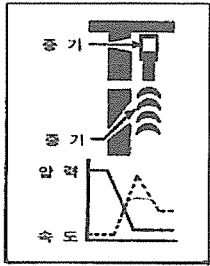
###### ㉞ 단단터빈(single stage turbine)

하나의 노즐과 하나의 회전날개 열로 구성되며 드라발 터빈이라 한다. 단식터빈은 증기의 열에너지를 한 stage에서 전부 회전력으로 변화시키므로 고속(10,000 ~ 30,000 rpm)이 되어 감속장치가 필요하다. 소용량 터빈에만 사용된다.

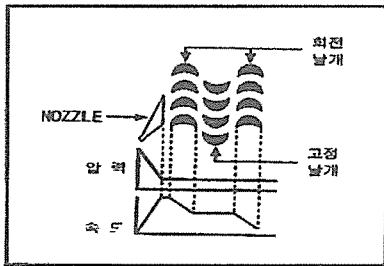
###### ㉟ 속도복식 터빈(velocity compound turbine)



단식터빈을 개향한 것으로 커티스 터빈(curtis turbine)이라 한다. 속도복식 터빈은 증기의 속도에너지를 몇 번에 나누어 이용 할 수 있으나 회전날개 열의 수가 많아지면 고정날개에서 마찰 등의 손실이 커지므로 3열이상의 회전날개는 사용하지 않고 주로 대용량 터빈의 첫 단에 많이 사용한다.



단식터빈

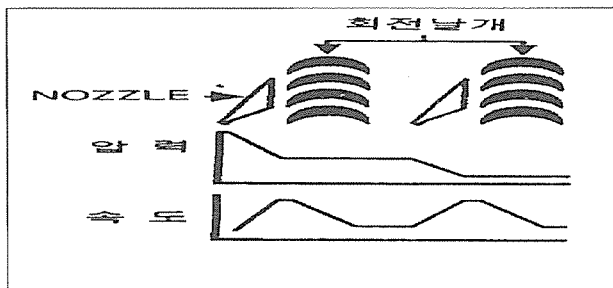


속도 복식터빈

㉔ 압력복식 터빈(pressure compound turbine)

단식터빈을 여러개 겹쳐 구성한 것으로 rateau 또는 zolly 터빈이라 한다.

증기는 제1단 노즐에서 일부 팽창하여 1단 회전날개를 돌리고, 다시 제2단, 제3단으로 각 단마다 동일한 작용을 반복한다. 각 단의 압력이 다르므로 각 단 사이에 다이어프램(diaphragm)이 필요하고, 대용량 터빈에 사용한다.



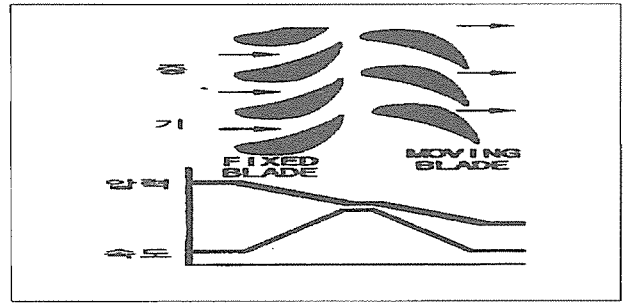
압력 복식터빈

㉕ 반동터빈

증기가 회전날개에서 팽창 할 때 반동력을 이용한 것으로 증기가 고정날개 및 회전날개 모두에서 팽창되어 충동력과 반동력으로 회전한다. 고정날개에서 증기 압력은 감소하고 속도는 증가되어 충동력으로 회전날개를 돌리며, 동시에 회전날개에서도 압력에너지가 속도에너지로 변환되면서 발생하는 반동력이 회전날개를 돌린다.

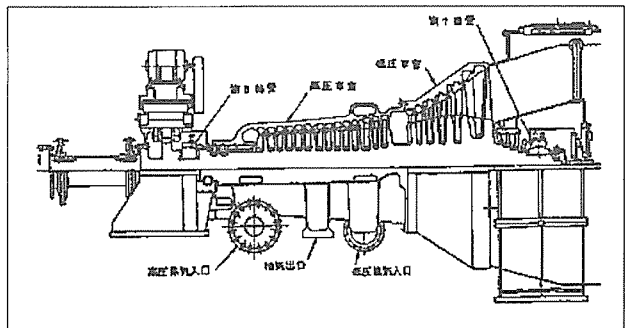
※ 반동터빈의 원리

반동터빈의 특징은 단면이 비대칭형인 회전날개를 사용하고 압력차이로 인하여 추력(thrust)이 발생하므로 추력베어링 및 복류형 터빈으로 추력을 방지한다.



반동터빈

2. 증기터빈의 구조



증기터빈 조립구조도

가. 케이싱

터빈 회전체의 외부를 덮고 있는 기밀실로서 증기가 일을 하기 위한 공간을 제공하며 내부에 다이어프램 및 패킹이 조립되어 있다.

○ 열응력 감소 문제

케이싱이 고압에 견디기 위하여 두꺼워지므로 기동 및 정지시 재료가 받는 열응력 발생은 증가한다. 그래서 터빈 케이싱 형태는 열응력 발생과 열팽창을 감소하기 위하여 직각인 평면부를 두지않고 원통과 원뿔을 조합한 형태로 제작되고 2중 케이싱 구조를 채택하여 케이싱에 발생하는 변형 쪼는 열응력 발생을 감소시킨다.

나. 로타

케이싱 내부로 유입된 증기의 작용으로 증기의 열에너지를 기계적 에너지로 변환시켜 발전기에 전달하는 부품을 말하며 축과 회전날개로 구성되며 충분한 강도를 가지고, 진동이 발생되지 않도록 제작해야한다.

로타의 종류에는 원판형(disc type)과 원통형(drumtype)으로 구성된다.

○ 임계속도(critical speed)

임계속도란 회전날개를 포함한 로타전체의 고유진동수와 회전속도에 따른 진동수가 일치하는 지점의 회전속도를 가르킨다. 기동, 정지 및 운전중 이 지점에 도달하면 공진현상으로 진동이 급격히 증가하므로, 운전원은 신속히 임계속도를 통과시키거나 정지 후 재 시동시켜야 한다. 임계속도는 정격속도에서 ± 15~20% dtkd 떨어져 있어야 한다.

○ 열응력

표면의 온도변화와 축 중심부까지 균일하게 가열되기까지의 시간동안 열응력 발생하고 빈번한 기동 및 정지, 큰 폭의 부하 또는 온도변화는 큰 응력이 발생되어 재료를 피로, 열화 및 균열을 진행시킨다.

○ 열팽창

축과 케이싱의 상대팽창(differential expansion)이 주의 할 사항으로 상대팽창량이 초과 할 경우 고정부와 회전날개와 같은 회전부의 접촉에 따른 고장발생의 원인이 되므로 즉시 조치하여야 한다.

다. 노즐과 다이어프램

(1) 노즐

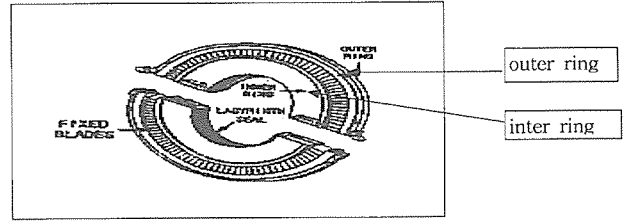
증기의 열에너지를 속도에너지로 바꾸는 작용을 하며 고정날개를 조합한 것이다.

축소-확대노즐은 단식 또는 속도복식의 소형터빈이나 혼식터빈의 커티스단에 사용하며, 축소노즐은 압력복식터빈에 사용한다.

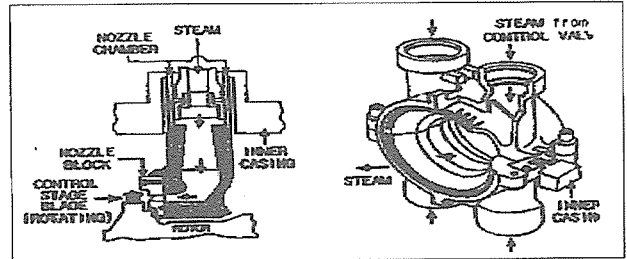
(2) 다이어프램(diaphragm)

내부 링과 외부링 사이에 고정날개가 붙은 한 열(row)을 다이어프램이라한다. 다이어프램의 외부링은 터빈 케이싱에 조립되어 고정되어있고, 내부행은 축을 둘러 싸고 있으며 래비린스 패킹(Labyrinth Packing)을 설치하여 증기누설을 방지한다.

고정날개는 움직이지 않으므로 압력에너지의 감소는 속도에너지의 증가를 가져오고 속도가 증가된 증기는 많은 운동에너지를 회전날개에 전달한다. 다이어프램은 회전날개 열과 함께 단(stage)을 형성하고, 각 단의 기밀을 유지하는 역할을 하며 상,하 2분할 구조이다. 저압터빈의 마지막 단 부근에서 수직은 자체의 원심력을 이용한 배제장치를 설치하여 물방울을 증기 통로 밖으로 배출하여야 한다.



다이어프램



노즐 블록

(3) 날개

회전날개는 축에 심어진 비틀림 날개로서 노즐로부터 나온 증기의 속도에너지로 직접 회전력으로 변환되는 부분이고, 고정날개는 회전날개에서 유출되는 증기의 운동방향을 바꾸어 다음 회전날개로 유효하게 분출시키는 역할을 한다.

날개의 끝부분에 끼워넣은 슈라우드 판(shroud ring, shroud band)의 기능은

- 날개 간격유지
- 증기가 원심력에 의해서 반경방향으로 튀어나오는 현상방지
- 날개의 진동방지 및 날개강도 유지
- 공진(resonance)

공진점을 정격 회전수에서 충분히 멀리하기위하여 회전날개의 단면형상 변경, 슈라우드 결합법, 타이 와이어(tie wire) 고정법 등을 이용하여 공진 특성을 변경한다.

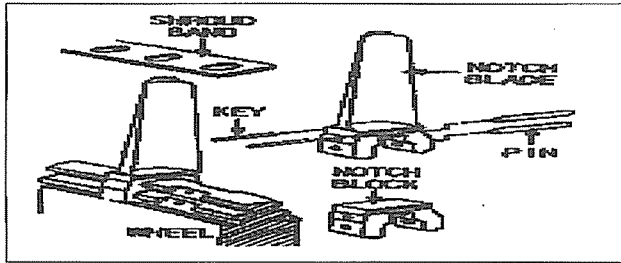
○ 침전물 부착

침전물이 부착되면 각 날개사이의 단면적이 축소되어 압력이 높게 되고, 날개 전,후의 차압이 증가되므로 축추력이 증가되어 추력베어링에 과부하를 초래한다.

저압 터빈 최종단과 그 앞단부근에서는 습도 10% 전.후의 습증기 상태에서 운전되므로 생성된 물방울이 날개의 입구 뒷면에 충돌하여 제동(brake)작용을 할 뿐만 아니라 부식 및 침식을 초래한다.

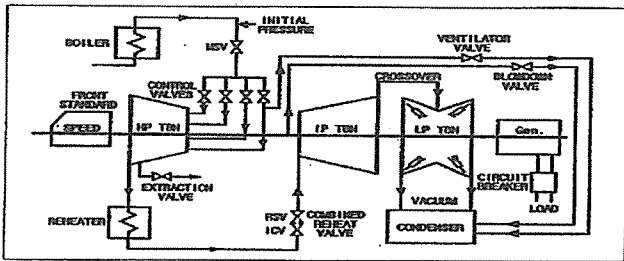
- 철저한 물관리와 저압 터빈 최종단 날개부근의 온도가 지나치게 내려가지 않도록 해야한다.
- 침식이 가장 심하게 발생하는 부위 즉 날개입구 뒷

면의 날개 끝(tip)에서 약 1/3정도를 경질금속으로 은납용접(silver soldering)을 하여 침식을 방지한다.



날개와 슈라우드 밴드

(4) 증기터빈 밸브배치도



터빈 밸브 배치도

(5) 조속장치

터빈은 부하 또는 증기 상태(압력, 온도)의 변화로 회전속도가 변화하므로 회전속도를 항상 일정 범위로 유지하여야 한다.

급격한 부하변동이나 정지로 인한 과속을 방지하며, 터빈정지시는 일시에 전력계통으로부터 분리시키도록 제어하는 장치 즉 조속장치(governing system)를 설치한다.

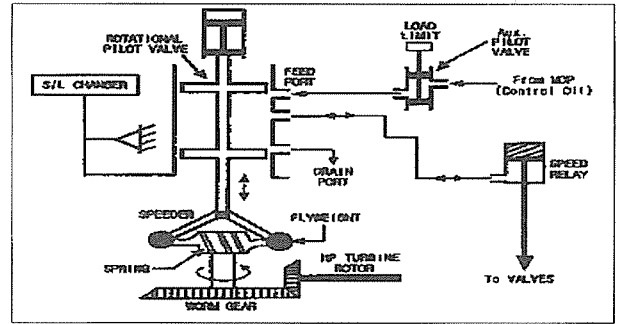
그 기능으로는

- 터빈에 들어가는 증기의 공급량을 조절하여 회전 속도 및 부하를 조절한다.
- 고장정지시는 증기 공급을 차단하여 터빈을 보호한다.

조속기의 종류로는 기계식 조속기와 유압식 조속기 및 전기식 조속기등으로 분류된다.

(가) 기계식 조속기

터빈 축에 직결 또는 기어에 연결되어 회전하는 원심추의 원심력 변화를 이용한다. 원심추의 원심력과 이것을 억제하려는 스프링의 장력과의 차이에 따라 제어유 계통에 연결된 로드(rod)의 위치를 변동시켜 제어유 계통내의 유압변화에 따라 주증기 조절밸브의 개도가 변경된다.

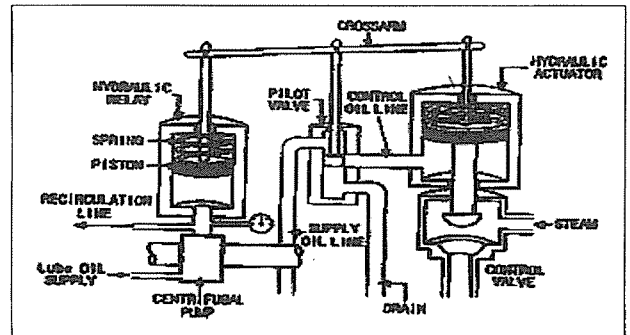


기계식 조속기

(나) 유압식 조속기

별도로 설치된 원심형 조속펌프(governor pump)의 속도변화에 따른 유압변동을 이용하여 증기 조절밸브를 조절한다.

회전속도의 변화는 조속펌프 출구압력의 변화로 나타나고, 압력변화는 조속기 하부의 벨로우에 공급되어 벨로우의 움직임에 따라 링크(link)가 움직여서 증기 조절밸브를 조절하는 유압을 변화시킨다.

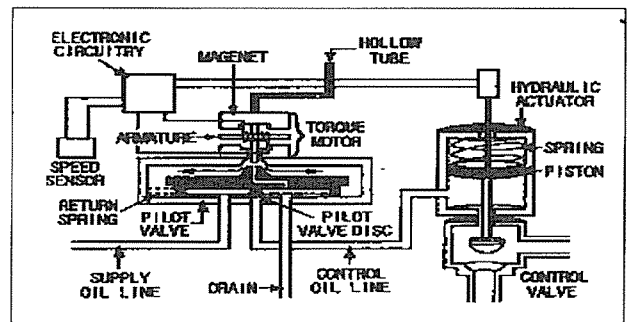


유압식 조속기

(다) 전기식 조속기

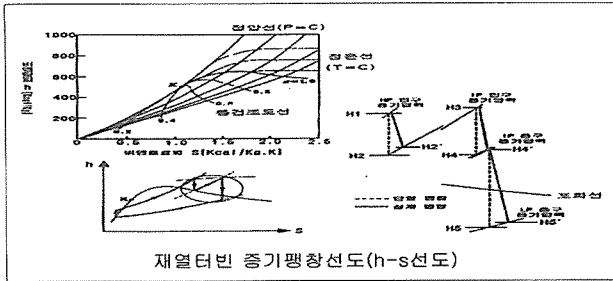
전력계통의 주파수에 의하여 자력이 가감되는 전기적 회로를 이용하는 조속이다.

주파수 변화에 따라 여자전류가 증감되어 레버(lever)위치를 변경하면 제어유에 의해 주증기 조절밸브의 개도를 조정한다.



전기식 조속기

### 3. 재열 증기터빈 사이클과 h-s 선도



재열터빈 증기팽창선도(h-s선도)

### 4. 성능

#### 가. 터빈 성능

##### (1) 터빈의 내부효율

터빈의 입구증기가 한국전력 발전소의 경우 복수기 압력 또는 산업체의 경우 배압까지 팽창함에 있어서 실제적인 일로 변화노던 열량 즉 열낙차(used energy)와 손실이 없는 증기의 이론 일량인 단열 열낙차와의 비율을 말한다.

$$\text{내부효율}(\eta_i) = \frac{\text{사용열낙차}}{\text{단열열낙차}} \times 100(\%)$$

##### (2) 내부효율 저하원인

- ① 운전측면의 저하원인
  - 사용증기의 순도저하에 따른 내부 스케일 형성
  - 마찰에 의한 실 스트립(seal strip)간격 증가
  - 노즐 및 회전날개의 마모 및 부식
- ② 설계측면의 저하원인
  - 노즐과 회전날개에서 발생하는 형상(profile)손실
  - 날개선단(tip 부)에서 발생하는 누설손실
  - 최종단에서 발생하는 배기손실
  - 저압터빈 최종단에서 발생하는 습분손실

##### (3) 터빈 손실

- ① 내부 손실
  - ㉠ 노즐손실
  - ㉡ 날개손실
  - ㉢ 회전손실
  - ㉣ 내부누설손실
- ② 외부 손실
  - ㉤ 레비린스 손실
  - ㉥ 기계손실
  - ㉦ 최종단락의 유출손실
  - ㉧ 방열 손실

### 5. 운전

#### ○ 운전 감시사항

- ① 터빈의 유입되는 증기온도와 터빈 금속온도 차이에 의한 열응력 발생, 케이싱과 축의 상대 팽창, 배압상태, 베어링의 윤활 등
- ② 회전체에서 진동의 변화상태를 계속 감시하는 것은 물론 기동, 정지시 위험속도 부근에서는 신속히 통과시켜야 한다.
- ③ 터빈 베어링에 공급되는 윤활유의 압력과 온도, 윤활유 펌프의 운전상태, 터빈의 회전속도 및 가속도의 변화, 증기 조절밸브의 동작상태 등 운전 중의 모든 변화상태로 계속 감시되어야 한다.

#### 가. 변압운전

변압운전이란 부하에 따라 주증기 압력을 변동시켜 운전하는 방법으로 주증기 제어변 개도를 크게 하여 교축손실을 감소시킬 뿐만 아니라, 터빈 열응력 및 보조기기의 동력절감을 가져와 부분부하에서 열효율을 증가시킨다.

##### 나. 순변압운전

30%부하이상에서 전부하까지 주증기 압력에 따라 출력을 조정하는 방식으로 보유열량이 적어 급격한 출력변동시 속응성이 없는 단점이 있으나 주증기 제어변에서 교축손실이 거의 없어 열효율면에서 가장 유리하다.

##### 다. 교축 변압운전

순 변압운전의 단점을 보완하기 위해 주증기 제어변을 완전히 열지않고 약 5- 15%정도 닫은 상태로 운전하다가 급격한 부하증발시 주증기 제어변을 이용하여 속응성을 부여한 것이다. 이운전방식은 주증기 제어변 교축손실 때문에 순 변압운전보다 0.4 - 1%의 효율저하가 생긴다.

##### 라. 복합변압운전

노즐 조속방식이 채용된 터빈, 즉 조속단이 있는 부분 분사터빈에서 효율이 좋은 고부하 영역에서는 정압운전을 하고 부분부하에서는 변압운전을 하는 방식을 말한다.

이렇게 하면 순간적인 급격한 부하변동은 제어변이 응동하여 주파수 조정이나 거버너 프리 운전도가

능하게 되어있다.

이 방식은 노즐 조속터빈과 변압운전의 장점을 조합한 운전방식으로 고효율 유지 및 부하에 대한 적응성이 좋아서 중간부하용으로 적합하다.

이상상태	원 인
진동증가	①터빈-발전기 축중심의 변화 및 기초 침하 ②터빈 회전날개의 절손 또는 날개에 스케일 형성 ③저어널 베어링 및 추력 베어링 이상발생 ④터빈 축의 bending 또는 무게 불균형 ⑤터빈에 물 유입 및 추기 역류
터빈 케이싱 상하온도차 심함	①케이싱의 이상 또는 기동시의 불충분한 드레인 조작 ②케이싱의 보온상태 불량 ③케이싱 증기관 연결부에서의 누설등
터빈 상대온도차 증가	①주증기 온도변화율 및 주증기온도와 터빈금속온도 차가 큼 ②기동시 가속율이 너무 높거나 부하변화율이 너무 크다. ③터빈 강제 냉각속도가 너무 크거나 터빈 추기량 급격한 변화
추력베어링의 이상	①터빈부하, 증기온도와 압력 및 터빈추기의 급격한 변화 ②추력베어링의 변형 ③윤활유 온도 이상 또는 유압감소 ④윤활유 불량, 물 또는 불순물 함유
터빈 유압 저하	①오일 펌프 구동불량 및 윤활유 탱크 레벨 저하 ②윤활유 공급배관 파열 ③윤활유펌프의 역지밸브 고장
저압터빈 배기실 온도 상승	①무부하운전 또는 저부하운전으로 저압터빈에서의 마찰증가로 온도증가 ②온도조절계통의 고장 ③복수터빈의 경우 복수기 진공저하 ④발전기 모터링 현상

### 마. 감압운전 또는 부분변압운전

심야, 공휴일 등 경부하시에는 발전소가 저부하 영역에서 운전하는 시간이 많아 저부하시의 효율저하를 줄이기 위한 변압운전이 요구되고 있으나, 정압운전용으로 설계된 설비에서는 변압운전을 실시하려면 사전에 충분한 검토를 거쳐야만 한다.

변압운전에 따른 역효과가 발생되지 않도록 미리 변압운전 시험을 실시하여 부하에 따른 최적 증기압 곡선을 구한 후 이 범위내에서 주증기 압력을 조절하여 주는 것을 부분 변압운전 또는 감압운전이라 한다.

### 바. 변압운전의 효과

#### (1) 열효율의 개선

변압운전이 터빈 열효율에 미치는 영향은 다음과 같으며 이 요인중 일부는 열효율을 저하하게 되므로 종합적인 비교가 필요하다.

#### (2) 고압터빈의 내부효율 상승

변압운전을 하게되면 주증기 압력이 정격보다 낮게 되므로 증기 비체적이 증가하여 터빈에 유입되는

증기의 체적유량이 거의 일정하게 유지되며 제어변개도가 크게되어 교축손실이 감소되므로 고압 터빈내 부효율이 상승된다.

#### (3) 압력저하에 따른 사이클 손실증가

주증기 압력이 낮으면 증기 열낙차가 감소되어 사이클 효율이 감소된다.

그러나, 일반적으로 감압운전을 할 경우 첫 번째 단 증기압력은 정압시보다 낮게 유지시키지 않기 때문에 터빈내부 열낙차 감소는 없으나 랭킨사이클에서 열 역학적 손실은 증가한다.

#### (4) 보일러 급수펌프 동력 감소

정속형 급수펌프는 보일러 급수량이 제어변에 의해 조절되기 때문에 변압운전을 실시하는 경우에도 동력절감의 효과가 없다.

그러나 변속-전동기 구동형 급수펌프는 주증기 압력에 따라 펌프 회전속도가 변하여 동력이 절감되며 증기-구동 급수펌프는 압력강하에 따른 증기소비량 감소와 저압증기 사용에 따른 이점으로 터빈 열효율을 상승시킨다.

#### (5) 저부하시 보일러 출구측 증기온도 확보

보일러 과열기 및 재열기 출구측 증기온도는 부하가 낮아짐에 따라 정격치보다 저하한다.

하지만 감압운전시 증기비열이 낮아지고 이에 따른 열 흡수가 양호하게 되어 증기온도가 증가된다. 또한 재열증기 온도도 변압운전에 따라 자연히 높아지게 된다.

#### (6) 고압터빈 열응력 감소

고압터빈 제어변에서 발생하는 교축손실 감소로 제어변 전후 압력차에 따른 온도강하가 줄어든다.

또한 증기 체적유량 증가로 터빈 첫 번째 노즐 다이아프램에 증기유입 면적이 늘어남에 따라 부분 유입에 따라 열응력이 감소된다.

#### (7) 보일러측 열응력 감소

변압운전은 보일러 튜브내 압력을 낮게 하여 압축응력을 경감시키는 등 튜브사용조건을 완화시켜 수명연장은 물론 파열사고도 줄일 수 있다.

#### (8) 기동시간 단축

터빈을 기동하기 전에 변압운전으로 터빈 금속온도를 높게 유지할 수 있으므로 일일 기동정지등으로 터빈을 재기동시 터빈 예열에 따른 시간을 줄일 수 있다.