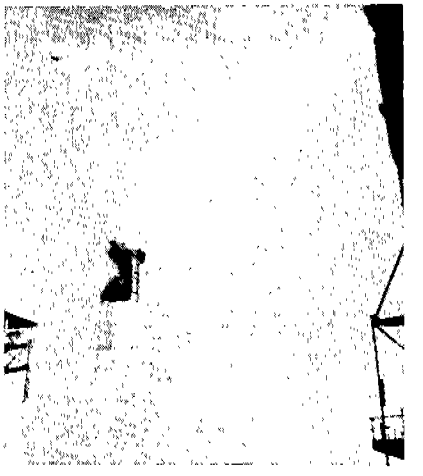
열병합발전 최신기술과 경제성 (3)



The Up-to-date Technology and Economical Efficiency of Co-Generation

한 혁
서울지역난방공사 기술이사

2·3 열병합 발전 플랜트 개념

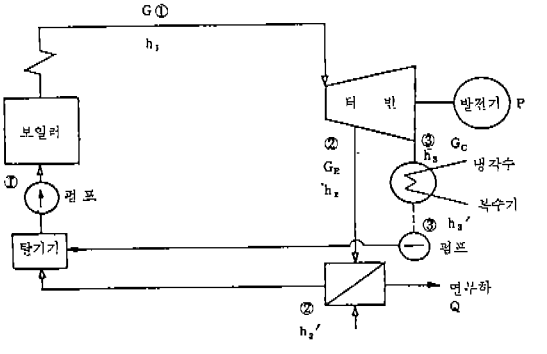
2·3·1 열병합발전 플랜트의 열역학적 고찰

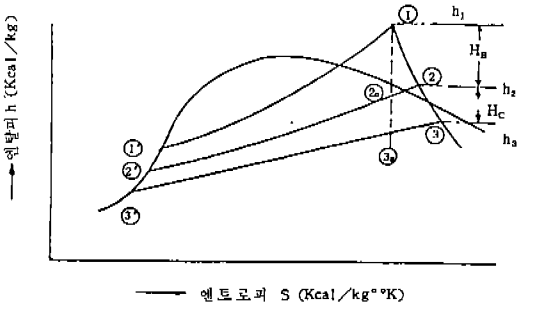
(1) 단순 열병합 사이클

그림2·8은 단순 열병합 사이클의 계통도이고 그림2·9는 이 사이클을 공학적으로 이용되는 증기선도(Mollier Diagram)에 나타낸 것이다.

그림 2·8과 그림 2·9에서 ①③④① 과정은 보통 복수 터빈에 의한 발전 사이클이며 ①②②① 과정은 배압 또는 추기 터빈에 의한 열병합 발전 사이클이다. 증기선도에서, 이론적으로 ②₀, ②₀ 까지 단열 팽창하나 실제로는 터빈 내부효율 때문에 ③, ②의 팽창선상으로 팽창하게 된다. 따라서 전력출력과 열출력의 관계는 다음과 같다.

P =발전기출력 (kW)
G_E =추기량 (kg/hr)
G_C =복수량 (kg/hr)
G $=G_E+G_C$: 터빈 유입증기량 (kg/hr)
P_E : G_E에 의한 전력 (kW)
P_C : G_C에 의한 전력 (kW)
ηi : 터빈 내부효율 (%)
ηm: 터빈 기계효율 (발전기 손실포함) (%)





〈그림 2·9〉 증기선도

Q : 열부하 (kcal/hr)

h : 엔탈피 (kcal/hr)

로 하고 그림상에 표기한 첨자를 참조하여 계산하면,

$$P=\frac{(G_C+G_E)\times(h_1-h_{20})\times\eta i\times\eta m+G_C(h_{20}-h_{30})}{860}$$

$$\times\eta i\times\eta m=\frac{G_E\times(h_1-h_{20})\times\eta i\times\eta m}{860}+$$

$$\frac{G_C\times(h_1-h_{20})\times\eta i\times\eta m+G_C\times(h_{20}-h_{30})\times\eta i\times\eta m}{860}$$

$$=\frac{G_E(h_1-h_2)\times\eta m}{860}+\frac{G_C(h_1-h_3)\times\eta m}{860}$$

$$=P_E+P_C$$

$$P_E=\frac{G_E\times(h_1-h_2)\times\eta m}{860}=\frac{G_E\times H_B\times\eta m}{860}$$

$$P_{C1}=\frac{G_C\times(h_1-h_2)\times\eta m}{860}=\frac{G_C\times H_B\times\eta m}{860}$$

$$P_{C0}=\frac{G_C\times(h_2-h_3)\times\eta m}{860}=\frac{G_C\times H_C\times\eta m}{860}$$

$\eta i=\frac{h_1-h_2}{h_1-h_{20}}=\frac{h_1-h_3}{h_1-h_{30}}$ 로 가정하면

$$\text{열전비}=\frac{\text{이용열량}}{\text{발생전력}}\ (\text{kcal/kWh})$$

$$\frac{Q}{P}=\frac{G_E\times(h_2-h_2')}{P}$$

이 열전비에 따라 열병합 발전의 터빈 형식이 선정된다. 한편 전력감소율은 다음 식으로 표시된다.

$$\text{전력감소율}=\frac{P_0}{P_E+P_0}$$

열병합 발전소의 총효율 ηg를 구하면

$$\eta g=\frac{\{G_E\times(h_1-h_2)+G_C(h_1-h_3)\}\times\eta m+G_E}{G_E(h_1-h_2')+G_C(h_1-h_3')/\eta_B}$$

$$(h_2-h_2')=\eta_B\times\frac{(P_E+P_C)\times860+Q}{G_E(h_1-h_2')+G_C(h_1-h_3')}$$

η_B : 보일러 효율

여기서 $G_C=0$로 하면 배압 터빈식 열병합 사이클이 되며 효율이 약 75~85% 정도로 매우 향상된다는 것은 매우 명백한 사실이다.

단, 전력과 열을 에너지 관점에서 동일하게 취급하여 계산한 것이기 때문에 전력과 열의 가치를 감안하여 경제성을 검토해야 한다.

(2) 재열 재생 열병합 사이클

열효율 향상을 위하여 대형 화력발전소에서는 재열 재생 사이클을 채택하고 있다. 따라서 열병합발전에서도 그 규모가 커지면 이 재열 재생 사이클을 채택하는 것이 더욱 유리하다.

재생 사이클은 터빈내 팽창도중에서 추가하여 급수를 가열함으로써 증기의 건도가 향상되며 아울러 열 효율도 향상된다. 또한 터빈의 날개에서의 부식 및 내부손실을 감소시키는 효과가 있다.

재열 재생 사이클과 같은 복잡한 사이클의 열효율을 구하려면 열평형도를 작성할 필요한 있다. 공업적으로 효율계산에 사용되는 2종류의 열소비율 계산은 다음과 같이 한다.

1) 열병합 터빈의 열소비율

$$HR_t=\frac{G_1H_1-G_3h_4+G_2(H_3-H_2)-Gg(Hg-hg)}{P}$$

$$-Q\ (\text{kcal/kWh})$$

2) 열병합 플랜트 열소비율

$$HR_P=\frac{G_1H_1-G_3h_4+G_2(H_3-H_2)-Gg(Hg-hg)}{P}$$

(kcal/kWh)

여기서

G_1 : 터빈 유입 증기량 (kg/hr)

H_1 : 터빈 입구 증기의 엔탈피 (kcal/kg)

G_2 : 재열기 증기량 (kg/hr)

H_2 : 재열기 입구 증기의 엔탈피 (kcal/kg)

H_3 : 재열기 출구 증기의 엔탈피 (kcal/kg)

G_3 : 보일러 급수량 (kg/hr)

h_4 : 보일러 입구 급수의 엔탈피 (kcal/kg)

Gg : 터빈 플랜트 외로 방출되었을 때의 증기량 (kg/hr)

Hg : Gg의 증기 엔탈피 (kcal/kg)

hg : Gg의 응축수 엔탈피 (kcal/kg)

Q : 열부하 (kcal/hr)

P ：발전단 출력 (kW)

(3) 가스 터빈 사이클

가스 터빈을 열병합발전 방식에 이용하는 경우에는 증기 터빈과는 달리 사이클내의 작동 유체로서 가스를 직접 열 에너지 전달의 매체로 사용하는 것이 일반적이다.

이때 열기관에서 방출되는 배열량을 회수하여 증기 또는 온수를 발생시켜 지역난방에 이용케 된다.

그림 2·10은 가스 터빈의 T－S 선도를 나타낸다.

2→3은 연소기에서의 흡열과정

4→1은 외부로의 배열과정이다.

가스 터빈의 배기온도 T_4는 고온이므로 배열보일러를 설치하여 배열량을 회수함으로써 T_5로 내려간다.

따라서 열입력 $Q_1 = C_P(T_3 - T_2)$ (kcal/kg)

배열량 $Q_2 = C_P(T_5 - T_1)$ (kcal/kg)

열이용률 $H = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{T_3 - T_2}$

단, T_1 ：압축기 입구 가스온도 (°K)

T_2 ：압축기 출구 가스온도 (°K)

T_3 ：터빈 입구 가스온도 (°K)

T_4 ：터빈 출구 가스온도 (°K)

T_5 ：배열 보일러 출구 가스온도 (°K)

C_P ：가스의 정압비열 (kcal/kg°K)

여기서 T_5가 낮아지면 H는 높아지나 실제로는 사용연료 및 보일러의 경제성 등에 의해 T_5의 한계가 있다.

밀폐계 (Closed Cycle)에서는 냉각수 온도, 냉각기의 경제성에 의하여 T_5에는 한계가 있으므로 T_3을 높임으로써 H를 높일 수 있다.

그림 2·11은 개방계 (Open Cycle)의 계통도를 나타낸다.

다음의 기호에 의하여 발전단 출력, 연소기 열입력 및 열이용률을 계산하는 방법은 아래와 같다.

P ：발전단 출력 (kW)

Q_0 ：연소기 열입력 (kcal/hr)

Q ：열출력 (kcal/hr)

η ：발전단 효율

η_m ：기계효율 (발전기효율 포함)

η_E ：배열보일러 효율

H ：열 이용률

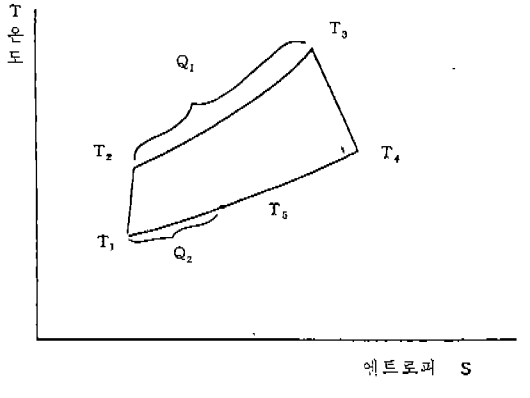
G ：가스유량 (kg/sec)

$$P = \frac{1}{860} G \cdot C_P \{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)\} \cdot \eta_m$$

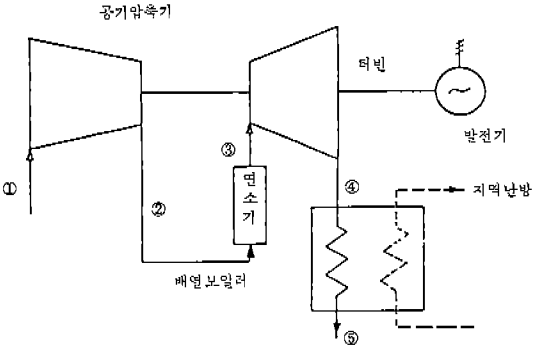
$$Q = G \cdot C_P (T_4 - T_5) \cdot \eta_E$$

$$Q_0 = \frac{860 \cdot P}{\eta} = \frac{G \cdot C_P \{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)\} \cdot \eta_m}{\eta}$$

$$H = \frac{860 \times P \times Q}{Q_0} = \left(1 + \frac{Q}{860 \times P}\right) \cdot \eta$$



〈그림 2 · 10〉 가스 터빈 T－S 선도



〈그림 2 · 11〉 가스 터빈 흐름 선도

2·3·2 각 터빈 형식의 개념 및 특징

(1) 증기 터빈 방식

(가) 배압 터빈

배압 터빈은 고온, 고압의 증기를 발전에 이용한 후 배기의 전량을 열부하로서 이용하는 방식이다.

배압은 필요 증기의 압력에 의하여 정해지며 배압의 선정치 파이프의 유체저항, 열교환기 내에서의 저항 및 열교환 필요 온도차 등을 고려하여 결정한다. 배압식 열병합발전은 발생하는 증기량과 전력의 비, 즉 열부하와 전기출력의 비(연전비)를 장치, 송수전 방식등을 채택하여 조정하는 경우가 있다.

배압 터빈에 의한 열병합 발전소에서는 발전량이 증기의 열량에 직접 관계가 되므로 지역난방 적용시 부하변동을 상쇄할 열전용 보일러 설비나 지역냉방을 겸하여 부하율을 높이든가 하여야 하며 산업용 열병합발전 설비로서는 공정열이 일정할 때 가장 경제적인 형태라 할 수 있다.

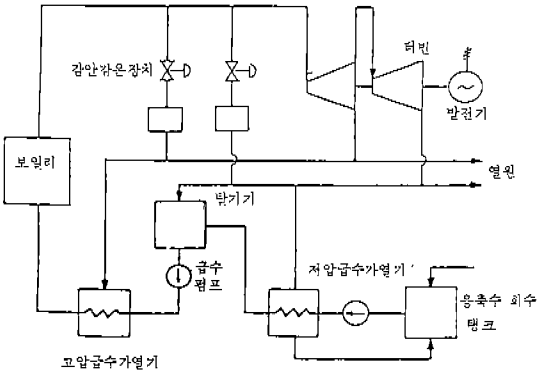
(나) 추기 배압 터빈

2종류 이상의 증기가 필요시 중간단에서 추기한 증기와 배기를 이용하는 방식으로 추기량을 조정함으로써 추기하지 않는 배압 터빈보다 열전비의 조절이 용이하다. 1단 추기 또는 2단 추기 등이 주로 적용되는데 제어가 복잡하게 된다.

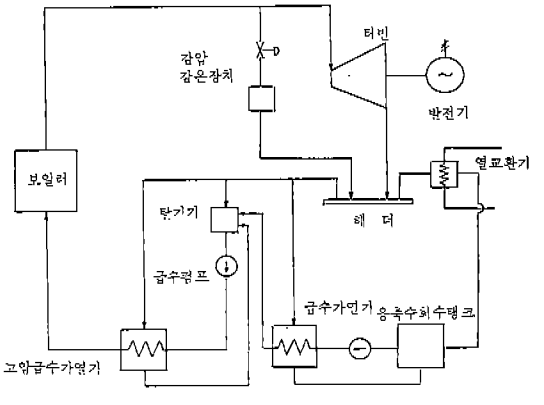
(다) 추기 복수 터빈

추기 복수 터빈은 팽창도중의 증기를 추기하여 열부하로 공급하고 배기는 복수기로 보내는 복수 터빈이다.

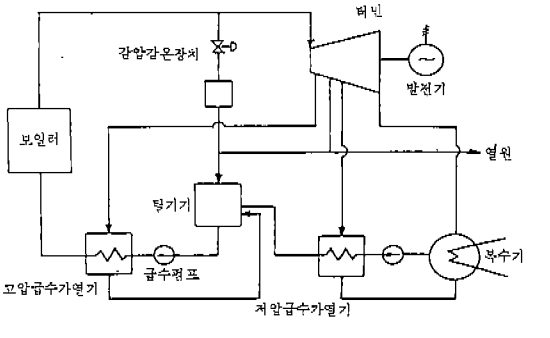
추기량과 복수량을 조절할 수 있으므로 전력과 열의 제어에 있어 한쪽을 100%, 다른 쪽을 0%에 가깝게 극단적인 경우까지 넓은 범위에 걸쳐 제어가 가능하다. 추기 단수도 1단, 2단, 3단 등으로 하여 여러 종류의 증기 열부하를 공



〈그림 2 · 13〉 추기 배압 터빈 흐름도

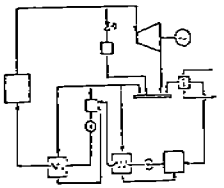
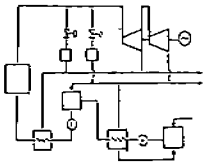
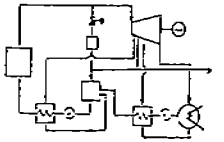
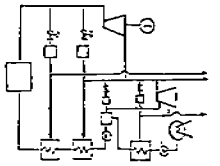


〈그림 2 · 12〉 배압 터빈 흐름도



〈그림 2 · 14〉 추기복수 터빈 흐름도

〈표2 · 5〉 증기 터빈 이용 형식별 특징 비교

구분 \ 형식	배 압 터 빈	추 기 배 압 터 빈	추 기 복 수 터 빈	배압식과 복수식의 조합
개 념 도				
공급증기성질	일정 · 압력의 증기가 필요한 경우	2종 이상의 일정 압력의 증기가 필요한 경우	일정 압력의 증기가 필요한 경우	
열부하 변동	부하변동이 큰 경우 설비의 이용율이 저하	부하변동이 큰 경우 설비의 이용율이 저하	부하변동이 있다해도 출력 일정의 운전이 이루어짐	배압식과 복수식의 조합방식. 대용량 플랜트에서 배압식과 복수식의 특징을 동시에 갖는다.
발 전 력	발전량은 열부하에 따라 정해지며 열 부하에 비하여 별로 차이가 없다.	좌 동	열부하에 상당한 발전력 이상의 전력을 확보해야할 경우	
전력계통에 대한 운전방법	병열 운전이 바람직함	좌 동	병열 혹은 단독	
외부 전원 정전시 대책 (보완전력의 확보)	대가 방출에 의해 어느정도 전력을 확보할 수 있으나 정전이 장기화할 경우 부적당	좌 동	외부전력의 유무에 관계없이 소요전력 확보가능. 외부전원이 불안정할 경우 적합	
경 제 성	배기열량을 유효하게 이용하기 때문에 가장 경제적임	배기열량을 유효하게 이용하기 때문에 경제적임.	복수터어빈 보다 경제적임.	
연료단가의 영향	복수터어빈 만큼 영향을 받지 않는다.	좌 동	복수터어빈과 배압 혹은 추기배압 터어빈과 특징을 합한 것임.	
냉 각 수 원	고려할 필요 없다.	좌 동	다량의 냉각수가 필요함.	

급할 수 있는 이점이 있다.

(라) 배압식과 복수식의 배합(Top Turbine)

배압 터빈과 복수 터빈이 갖는 특징을 동시에 갖게 되는 방법으로 고온, 고압 증기원이 있는 경우 그외 압력을 어느 정도 낮게할 필요가 있을 때 설치되는 터빈 혹은 성능 향상의 목적으로 현재 사용하고 있는 터빈 앞쪽에 설치하는 고온 고압용 터빈을 말한다.

(2) 가스 터빈 방식

가스 터빈은 근래에 와서 급속히 고온, 대형화되고 있으며 냉각수가 거의 필요치 않아 열병합발전 플랜트로서 채택이 늘고 있다.

가스 터빈에는 개회로 방식(Open Cycle System)과 폐회로 방식(Closed Cycle System)이 있으나 일반적으로 장치의 간편화, 운전의 용이성으로 인하여 개회로 방식이 대부분이다.

가스 터빈 방식의 특징으로는 다음과 같은 것이 있다.

- 플랜트 대지 소요면적이 비교적 적어 도심지에 유리하다.
- 냉각수가 문제되지 않는다.
- 소음에 대한 대책이 필요하다.
- 고급연료를 사용하게 된다.

(가) 개회로 방식 이용 열병합 발전

대기를 흡입하여 압축한 다음, 연소기에서 고온 고압의 가스로 만들어 터빈 입구에서 4~10kg/cm²a, 650~950℃로 터빈을 돌리고 배기는 350~500℃의 고온으로 대기에 배출케 되는데 이때 배기손실은 65~75%정도가 된다. 따라서 이 배기손실을 줄이기 위하여 다음과 같은 방법을 이용할 수 있다.

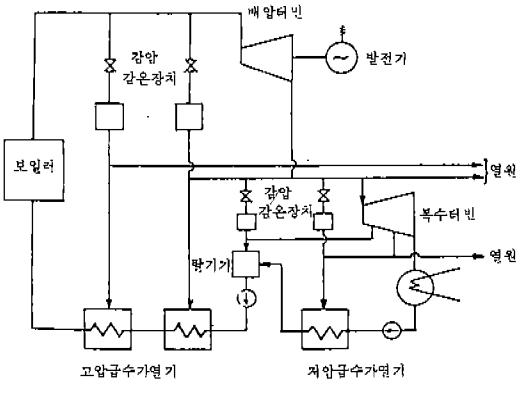
① 배열 보일러에 의한 열량 회수방법

② 배기 가스중의 잔존공기를 연료용 공기로서 이용하고 보일러에 연료를 추가하는 방법

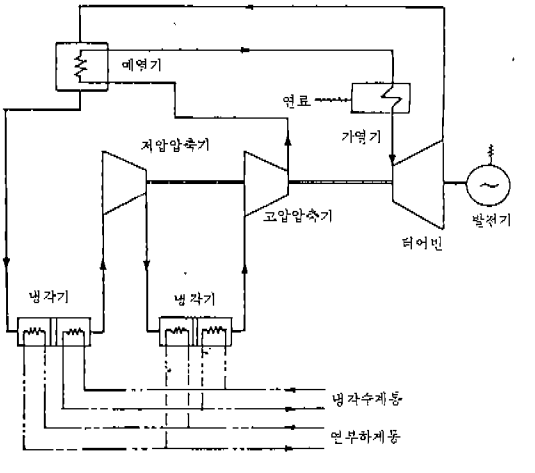
①의 방법은 배기의 열교환용으로 배열 보일러를 사용하고 증기 또는 고온수를 발생시켜 지역난방 열원으로 이용하는 방법이며, ②의 방법은 복합화력 방식으로 연료를 추가 연소시켜 보일러에 들어가는 배기가스의 온도를 상승시켜 열출력을 증가시키고 보일러의 전열면적을 적게 하는 방법이다.

(나) 폐회로 방식 이용 열병합 발전

공기, 탄산가스(CO_2), 질소(N_2), 헬륨(He) 등을 열매체로 하여 사이클을 형성하여 압축 가열 팽창시킨후 배기를 열교환기에서 열교환하고 이를 다시 압축기로 보내는 작용을 반복시키는 것으로 배기가 열교환기에서 열교환할 때 필요

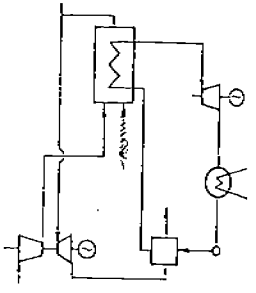
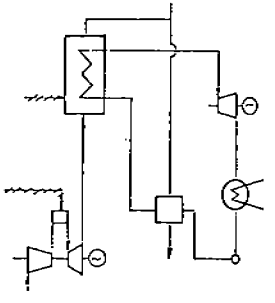
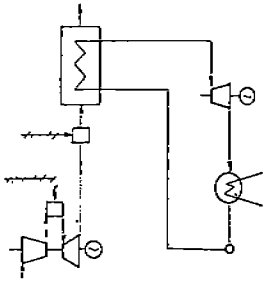
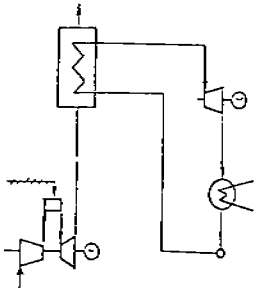


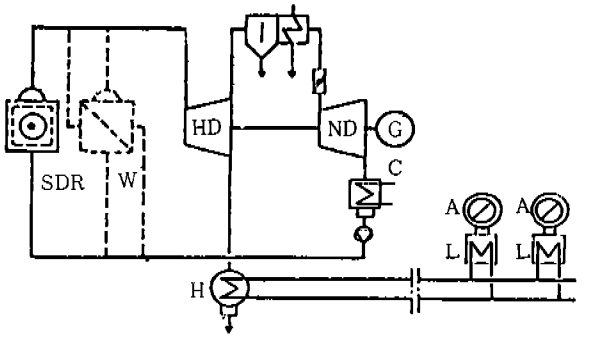
〈그림 2 · 15〉 Top 터빈 흐름도

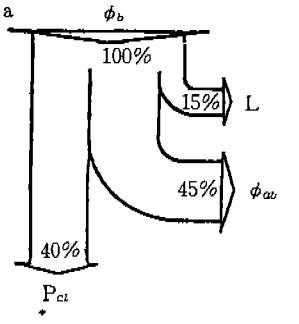


〈그림2 · 16〉 가스 터빈 흐름도

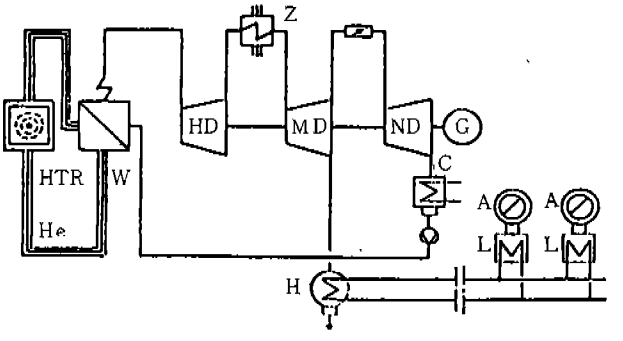
〈표 2 · 6〉 복합 사이클 플랜트의 특징

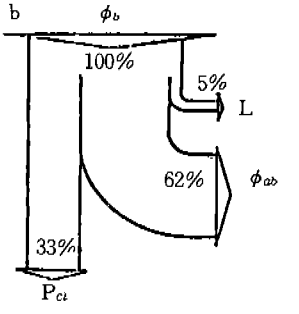
	과급보일러방식	배기재연방식	배열회수조연방식	배열회수방식
구성				
특징	이 방법은 보일러를 가압하여 가스터어빈의 조연기에 의하여 보일러의 배가스로 가스터어빈을 구동하는 방법이다. (1) 증기터어빈 출력비가 크다. (2) 보일러에 사용되는 연료는 가스터어빈에 의하여 결정된다. (3) 증기터어빈의 단독운전은 불가능하다.	이 방법은 가스터어빈의 배가스를 증기터어빈용 보일러에 들어가도록 하여 배열을 회수하는 동시에 연료를 점가하여 가열하는 방법이다. (1) 운전제어가 복잡하다. (2) 증기터어빈 출력비가 크다. (3) 열효율은 가스터어빈의 대기를 최대로 이용하기 때문에 증기터어빈의 용량에 비하여 높다. (4) 증기터어빈의 단독운전이 가능하다.	이 방법은 가스터어빈의 배가스를 배열보일러로 들어가는 도중에 조연하여 증기조건을 항상 시킴으로써 작동범위를 넓힐 수 있다. (1) 조연량이 많게 되면 증기터어빈 출력비가 커진다. (2) 가스터어빈의 배가스 온도가 높을 경우에는 최적 조연량은 감소한다. (3) 증기터어빈의 단독운전은 불가능하다.	이 방법은 가스터어빈의 배가스를 배열보일러에 주입하여 증기를 발생함으로써 증기터어빈을 구동케하는 방법이며, 가장 단순한 방법이다. (1) 가스터어빈 출력비가 크다. (2) 가스터어빈을 고온화함으로써 열효율을 향상시킬 수 있다. (3) 기동시간이 짧다. (4) 증기터어빈 단독운전이 불가능하다.



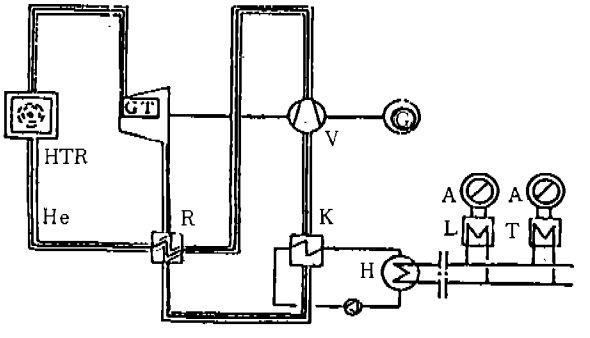


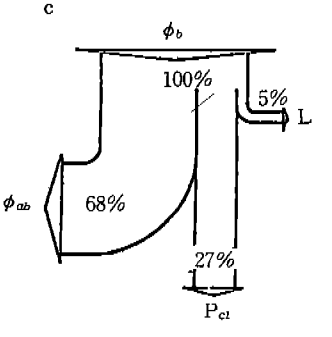
a : SDR열병합발전방식





b : HTR열병합발전방식





c : 가스터빈식 HTR

SDR = 포화증기 Reactor
HTR = 고온 Reactor
HD = 고압터빈
MD = 중압터빈
ND = 저압터빈
Z = 재일기
G = 발진기
H = 가열복수기
C = 복수기
W = 열교환기
GT = 가스터빈
V = 가축기 압
R = 리큐퍼레이터 (Recuperator)
K = 냉각기
H_e = 헬륨
A = 열수요자
L = 지역열교환기
ϕ_{ab} = 지역난방에 이용되는 열량
ϕ_b = 투입열량
P_{cl} = 전력
L = 손실

〈표 2 · 17〉 원자력 이용 열병합 발전

〈표 7〉 원자력이용 열병합발전 방식

Plant	Location	Country	Reactor type	Turbine type	Maximum heating output Gcal MW		Maximum electrical output MW	Inlet steam conditions bar	Commissioned
Agesta	Stockholm	S	BWR	back pressure	56	65	10	13-20/sat	1964
Bilibino	Cuchotka	SU	PWR	extraction/ condensing	25	29	12	64/sat	1974
Bilibino	Cuchotka	SU	PWR	extraction/ condensing	25	29	12	64/sat	1974
Bilibino	Cuchotka	SU	PWR	extraction/ condensing	25	29	12	64/sat	1976
Bilibion	Cuchotka	SU	PWR	extraction/ condensing	25	29	12	64/sat	1976

열량을 얻는다.

(다) 증기 터빈과의 조합(Combined Cycle)

이 방법은 가스 터빈과 증기 터빈의 조합으로 건설비의 절감과 플랜트 효율의 상승효과가 있다. 가스 터빈과의 조합방법에 의하여 크게 다음의 4가지로 구분한다.

① 배열회수 방식
② 배기회수 조연 방식
③ 배기재연 방식
④ 과급보일러 방식

위의 4가지 종류에 대한 구성도 및 특징은 표 2·6과 같다.

(3) 원자력방식

원자력을 이용한 지역난방 방식이란 핵연료를 이용한 발전방식으로 저압 터빈에서 열을 추기하거나 배기를 지역 난방의 열원으로 이용하게 된다.

원자력이용 지역난방방식은 SDR (Saturated Steam Reactor : Light and Heavy Water Reactor) 열병합발전 방식, HTR (Hight Temperature Reactor) 열병합발전 방식, 가스 터빈식 HTR (High Temperature Reactor)이 있으며 그림 2·17에 각 발전소 사이클을 표시하였다.

원자력 발전의 특징으로서 주증기가 포화증기 상태인 300℃ 전후이므로 일반 화력의 500℃ 전후에 비하여 단위 출력당 다량의 증기를 필요로 하게 되어 지역난방에 사용할 수 있는 배기증기량도 많다.

보통 SDR방식이 실용화되었으며 HTR 방식은 아직 대용량 발전소에서 그 경제성과 실현성이 증명되지는 않았으나 두가지 형태의 HTR방식이 연구되고 있다.

표 2·7은 현재 설치된 원자력 열병합 발전소이다. 〈계 속〉