

열병합 발전에 의한 집단에너지 공급시스템(2)

글/민중기(한국전력기술(주)차장)

목 차

1. 열병합 발전의 개념
2. 열병합 발전방식
 - (1) 증기터빈 토핑 사이클
 - (2) 가스터빈 토핑 사이클
 - (3) 가스터빈/증기터빈 복합 토핑 사이클
 - (4) 디젤엔진 토핑 사이클
 - (5) 버토밍 사이클
3. 열병합 발전 구성설비의 특성
 - (1) 가스터빈
 - (2) 배열회수 보일러
4. 열병합 발전에 의한 집단지역 냉·난방
 - (1) 지역난방 대상지역 및 열부하
 - (2) 열부하 특성
 - (3) 신도시의 열병합 발전방식
 - (4) 설비의 개요
 - (5) 경제성

3. 열병합 발전 구성설비의 특성

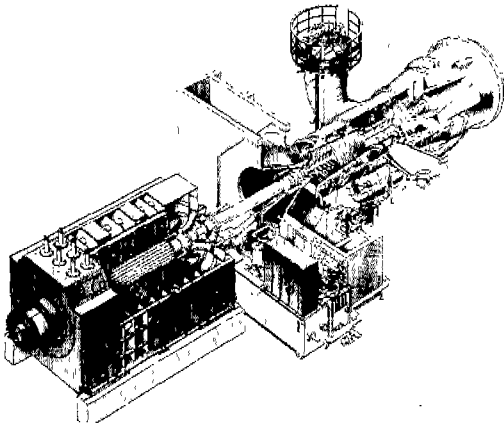
열병합 발전설비의 주요 구성설비로는 증기터빈, 보일러, 가스터빈, 배열회수 보일러(HRSG), 디젤엔진 등이 있으나, 증기터빈, 보일러 그리고 디젤엔진은 널리 이용되고 있는 설비이므로 본 설명에서 생략하고 여기서는 가스터빈과 배열회수 보일러에 대하여 그 특성을 간략히 설명키로 한다.

(1) 가스터빈

가스터빈은 발전기와 동일축에 연결된 공기 압축기로부터 압축된 공기와 연료 공급장치로부터 공급된 연료가 연소기(Combustor) 내에서 혼합 연소하여 발생된 약 950°C~1,250°C 정도의 연소가스를 작동유체로 하여 발전기에 회전력을 전달하는 장치이다. 가스터빈의 배출가스 온도는 510°C~580°C 정도로 배기열손실이 커 열효율이 27%~33% 정도로 매우 낮으며, 연료는 LNG(천연가스), 경유 그리고 정제된 중유 등을 사용할 수 있다. 최근에는 석탄을 가스화하여 연료로 사용하는 방안이 개발되고 있다.

공기 압축기는 공기 취입설비를 통하여 대기 중의 공기를 흡입해 대기압의 10~14배 정도로 압축한 후 연소기로 보내며, 압축기의 입구 안내익은 공기유량을 제어할 수 있는 가변익으로 되어 있다.

연소기는 분사된 연료를 압축기에서 유입된 압축공기와 혼합시켜 약 1,100°C 이상의 고온에서 정압



<그림 10> 가스터빈 발전기 전개도

연소하는 장치로서 광범위한 연료유량과 고속기류 속에서도 안정된 연소를 유지토록 되어 있다.

가스터빈은 이와 같이 공기 압축기, 터빈축, 연소기 등으로 구성되어 있고 부대설비로는 공기 흡입설비, 배출설비 및 보조설비가 있다 <그림 10>.

가스터빈은 증기터빈이나 보일러와 같이 용량 및 형식 등의 기술사양을 주문생산하는 것이 아니고, 각 제작자의 고유 규격제품으로 되어 있으며, 건설실적이 많은 가스터빈의 주요 규격은 다음 <표 1>과 같다.

<표 1> 가스터빈 규격 비교

제 작사	항목 모델No.	용 력 [MW]	압축비 [-]	공기유량 [KG/S]	배가스 유 량 [KG/S]	TEN 입구 가스온도 [C]	배가스 온 도 [C]	연 료 사용량 [KG/S]
GE	FRA. 7EA	83.16	12.47	292.19	296.61	1104.4	529.8	5.12
ARG	PG5371	26.16	10.20	122.44	123.46	957.0	484.0	1.94
	PG6541E	38.28	11.30	137.59	139.15	1104.0	540.0	2.60
KWU	V84.2	105.00	10.60	350.00	355.00	1040.0	540.0	6.00
W	W501 D5	104.00	14.20	358.79	366.5	-	521.0	6.40
ABB	GT11N	81.60	12.40	310.00	315.00	1210	515.0	5.17

자료출처 : Gas Turbine World Performance Spec. 1989. 6.

(2) 배열회수 보일러(Heat Recovery Steam Generator)

배열회수 보일러는 가스터빈 배기 중의 열을 흡수하여 증기나 온수를 생산하는 장치로서 그 형식에는 <표2>에 나타난 바와 같이 연소방식, 발생증기, 열교환형태, 배치에 따라 분류된다.

먼저, 연소방식에 따른 분류에는 가스터빈에서 배출된 배가스의 열만을 회수하는 순수 배열회수 보일러와 가스터빈의 배기중 용존산소를 이용하여 연료를 추가 연소시키는 배기조연방식이 있으며, 또한 가스터빈 배기를 연소용 공기로 이용하는 재연식 보일러(Refired Boiler)가 있다.

단압식 보일러는 보일러에서 발생된 증기가 1종류로 한정되므로 증기/물 계통이 가장 간단하나, 복잡식은 단압식에 비해 계통이 복잡하게 된다.

그러나, 복잡식은 배기가스의 열회수율이 높아 플랜트 효율이 좋아진다.

단압식 및 복잡식의 선정에 있어서 이용율이 낮은 지역과 연료비가 비교적 저렴한 지역에서는 단압식을 주로 사용하지만 우리나라와 같이 에너지 가격이 높은 지역에서는 대용량화와 더불어 복잡식을 많이 채용하고 있다.

<표 2> 배열회수보일러 형식

열 원	발생증기	열교환형태	배 치
조 연 식	단 압 식	강제순환식	일 식
비조연식	복 압 식	자연순환식	평 식

가) 비조연식 배열회수 보일러(Unfired HRSG)

가스터빈에서 배기되는 고온의 폐열만을 이용하여 증기 또는 온수를 생산하는 보일러로 설비가 간단하여 운전조작이 용이하다.

그러나, 비조연식 배열회수 보일러는 가스측과 증기 또는 물측의 온도차가 적고, 가스측 발전 사이클의 고효율화를 위하여 가스측 압력 손실을 제한하고 있기 때문에 종래의 화력 보일러와 비교하면 중량, 용적면에서 약간 큰 경향이 있다.

최근에는 가스터빈의 고온화로 배열회수 보일러의 열원이 되는 배가스의 온도도 고온화가 되어 조연장치를 갖고 있지 않은 배열회수형이 일반적이며, 미국을 중심으로 유럽, 일본 등 세계적으로 널리 사용되고 있다.

비조연식 배열회수 보일러의 특징은 다음과 같다.

- 시스템이 간단하다.
- 초기 투자비가 적다.
- 가스터빈이 고온화 할수록 플랜트의 열효율 상승율이 크다.
- 기동시간이 짧다.
- 가스터빈 정지시 HRSG의 단독운전이 불가능하다.

나) 조연식 배열회수 보일러(Supplementary Fired HRSG)

가스터빈 배가스 중의 용존산소를 이용하여 연료를 추가 연소하는 방식으로 배기조연방식은 가스터빈의 저부하 운전시 배열회수 보일러의 부분 부하운전으로 인한 성능저하를 방지할 수 있으나, 부하변동이 빈번할 경우 계통의 운전방식을 자주 변경해야 하는 결점이 있다. 또한, 최근에는 가스터빈 입구 연소가스의 고온화에 따라 배가스 중 잔존산소량(O₂ 농도 15% 정도)이 감소되어 추가연료의 연소용 공기로 사용하기가 어려워지며, 추가 연소에 따른 열효율 향상 효과도 적기 때문에 이용율이 낮아지고 있는 추세이다.

배기조연식은 배기를 조연할 수 있는 버너를 가스터빈 출구와 HRSG 입구 사이에 설치하게 되나 배가스 온도를 무한정 높일 수 없으며, 최대 HRSG 입구가스 온도는 1,700 °F(927°C)로 제한하고 있다.

배기조연식 배열회수 보일러의 특징은 다음과 같다.

- 조연량이 많아질수록 배열회수 보일러의 출력이 증대한다.
- 가스터빈 배가스 온도에 따라 최적 조연량이 결정되고 가스터빈이 고온화 될수록 조연량은 적게

된다.

- 기동시간은 비조연식에 비해 약간 길다.
- 가스터빈 정지시 HRSG의 단독운전은 불가능하다.

다) 재연식 보일러(Refired Boiler)

이 방식은 보일러 압입통풍기(FD Fan) 대신 가스터빈 발전설비를 설치하고, 그 배기를 보일러에 유입시켜 그 여열을 회수함과 동시에 보일러 연료의 연소용 공기로 사용하는 방식이다.

보일러의 공기에열기가 필요없게 되므로 일반적으로 보일러 배가스의 열회수 목적으로 급수가열기 등을 설치한다.

재연식 보일러의 특징은

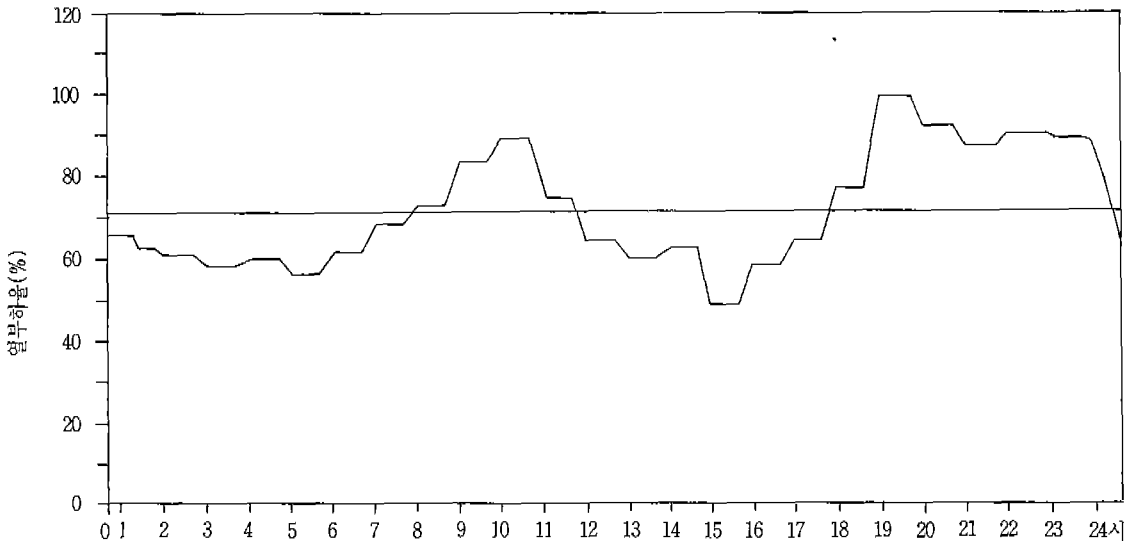
- 운전제어 계통이 복잡하다.
- 증기터빈 출력비가 크다.
- 보일러용 연료의 선택이 가스터빈과 무관하다.
- 가스터빈 고온화에 의해 배가스 중의 잔존산소량이 적어지므로 압입통풍기에 의해 보일러 연소공기를 보충할 필요가 있다.
- 가스터빈 정지시에도 단독운전이 가능하다.

4. 열병합 발전에 의한 집단지역 냉난방

정부의 정책사업으로 추진중인 수도권 5개 시도(평촌, 산본, 분당, 일산, 중동)에는

- 에너지 이용효율을 높여 국가의 경제적 이익을 도모하고
- 경제적인 시설투자로 저렴한 양질의 열과 전기에너지 공급
- 열원의 집중관리로 방제효과 및 환경공해 감소
- 전력부하 중심지인 수도권에 비상전원 확보
- 에너지 중단없는 공급(연중 24시간)으로 쾌적한 주거환경 조성

등을 목적으로 열병합 발전소를 이용한 대규모 집단에너지 공급 방식이 도입되어 현재 건설 중에 있으며, 그 설비 개요는 다음과 같다.



<그림 11> 일일 열부하 곡선

(1) 지역난방 대상지역 및 열부하

열병합 발전에 의한 집단에너지 공급 대상지역은 평촌, 산본, 분당, 일산, 중동 등 5개 신도시와 그 주변 신개발 주택단지 등이며, 열수요량은 아래표에서 보는 바와 같이 1개 열병합 발전소에서 공급하는 열부하가 포화년도 기준시 약 500~900Gcal/Hr로 예상되며 지역난방용 열병합 발전소로는 세계 최대 규모가 된다 <표 3>.

<표 3> 지역난방 대상지역 및 최대 열부하

열병합 발전소 명	열공급지역	열공급대상 가구수(세대)	예상최대열부하 (Gcal/시간)
안양 열병합 발전소	평촌신도시	42,500	308
	산본신도시	42,500	247
	과 권	13,500	42
	계	98,500	592
분당 열병합 발전소	분당신도시	97,500	890
부천 열병합 발전소	중동신도시	67,500	551
일산 열병합 발전소	일산신도시	69,000	634
	일산주변지역	50,300	215
	계	119,300	849

자료출처: 안양, 분당, 일산, 부천 열병합 발전소 건설 타당성 보고서, 한전 1990. 5.

(2) 열부하 특성

지역난방용 일간 열부하는 그림에서 보는 바와 같이 오전과 오후 2차례에 걸쳐 첨두 부하가 나타난다.

오전의 첨두 부하는 주택에서 급탕소요가 많고 업무용 빌딩의 난방이 시작되는 8시~10시경이며, 오후는 기온이 낮아지고 급탕소요가 많은 6~8시경에 최대부하가 나타난다. 집단에너지 공급 방식은 기존의 간헐 난방이 아니고 연속난방이므로 열부하가 비교적 균일하여 5개 신도시의 일평균 열부하율은 약 70% 정도로 비교적 높은 편이다.

그러나, 연간 열부하는 총 열부하의 약 50%가 12월~2월 사이의 3개월에 집중되어 있으며 하절기에는 급탕부하만 극히 일부 있어 연간 열부하율은 약 25% 수준으로 지역난방이 발달한 북구라파에 비하여 다소 낮은 편이다. 이는 연평균 대기온도가 수도권 권의 경우 약 12°C로 비교적 높으며, 반면 북구라파의 경우 약 4~7°C로 난방기간이 우리보다 긴 때문이다 <그림 11>.

(3) 신도시의 열병합 발전 방식

집단에너지 공급을 위한 열병합 방식에는 앞서 설명한 바와 같이 보일러/증기터빈방식, 가스터빈방식,

가스터빈/증기터빈 복합사이클방식, 디젤엔진방식 등 여러가지 방식이 있을 수 있으나, 본 열병합 발전설비는 수도권의 주거지역 인근에 위치하므로

- 수도권의 환경보전을 위해 사용연료가 LNG 또는 저유황경유로 제한되며
- 신도시 건설과 연계하여 적기에 열공급을 할 수 있도록 건설공기가 짧아야 하며
- 고가의 LNG 사용으로 열효율이 높아야 하며
- 열부하가 극히 낮은 하절기에는 수도권의 전력 첨부부하를 담당할 수 있도록 일일기동정지가 용이한 설비이어야 하며
- 내륙에 위치하므로 많은 양의 냉각수 확보가 곤란하므로 냉각수 수요가 적어야 하며
- 경제성이 우수하여 기존 난방방식보다 열공급 단가가 저렴해야 하는 등

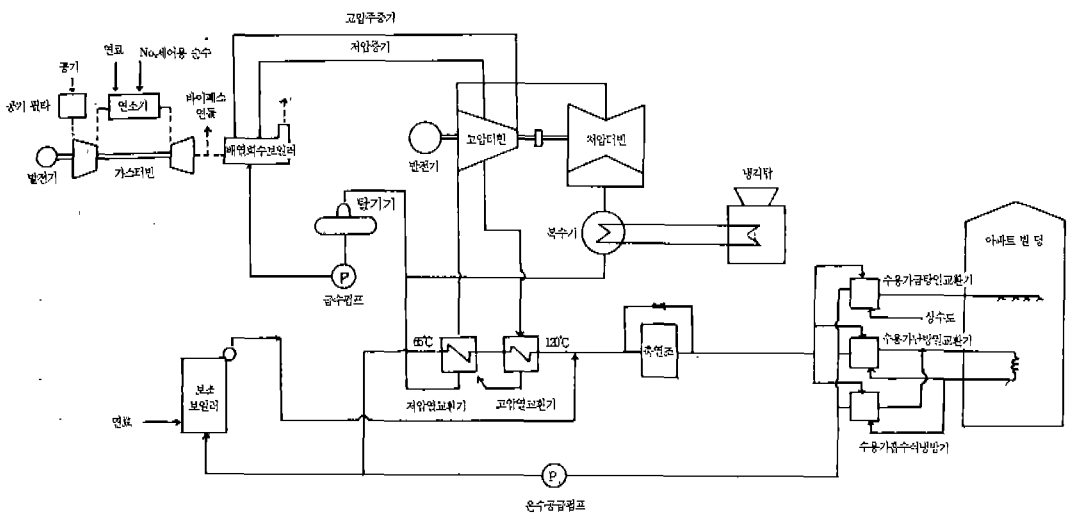
많은 제한조건이 있어 이를 만족시킬 수 있는 열병합 방식을 검토한 결과 가스터빈/증기터빈 복

합사이클방식이 최적으로 평가되어 5개 신도시의 집단에너지 공급 열병합 발전 방식으로 채택되었다.

(4) 설비의 개요

신도시에 건설되는 집단에너지 공급 설비에는 <그림 12>에서 보는 바와 같이 발전계통, 온수생산 및 공급계통 그리고 보조열원계통 등 크게 3가지 계통이 있으며, 발전계통은 1개의 복합사이클로 3~5대의 고효율 산업용 가스터빈 발전기와 이에 상응하는 배열회수 보일러 그리고 고압터빈, 저압복수터빈, 발전기, 탈기, 복수기, 냉각탑 등이 각 1기씩 구성되어 있다.

또한, 지역냉난방용 온수생산 및 공급계통에는 지역난방 열교환기, 축열조, 온수공급 및 회수펌프, 수용가열교환기, 수용가흡수식냉동기 그리고 온수 배관망 등으로 이루어졌으며, 보조열원으로 보조보일러가



<그림 12> 지역 냉·난방 열병합 발전 시스템

각 발전소별로 2기씩 건설 중에 있다 <그림 12>.

동절기 열병합 발전시의 열효율은 약 84%(저위발열량 기준)이며, 하절기에 열부하가 없어 발전계통만 운전시에는 약 48%(저위발열량 기준) 정도로 일반 화력 발전소에 비해 열효율이 매우 높은 편이며, 설비용량은 <표 4>와 같다.

가) 가스터빈 발전기

본 열병합 발전소에 사용되는 가스터빈 발전기는 고효율 산업용으로 옥내형이며, 가스터빈은 직접 발전기에 연결되어 발전기를 3,600rpm으로 구동시킨다. 가스터빈 및 발전기에 대한 부품은 현장설치 작업의 최소화를 위하여 모듈로 공장조립된 것이며, 모든 배관 및 와이어링은 각 모듈별로 완성되어 다른 모듈과 결합된 것이다. 각 가스터빈 발전기는 증기터빈 정지시에도 독립적으로 가스터빈만 운전할 수 있도록 배기 바이패스 연동을 갖추고 있으며, 질소산화물(NOx) 방출은 50ppm이하로 제어할 수 있는 NOx 제어장치가 가스터빈에 설치되어 있다.

가스터빈의 연료는 LNG가 주연료이며, 만일 LNG 공급계통에 사고가 있을시는 경유도 사용할 수 있도록 장치가 되어 있다.

나) 배열회수 보일러(HRSG)

가스터빈 1기당 배열회수 보일러는 1기씩 설치되며 형식은 가스터빈 배기열만을 이용하는 비조연 방식으로 열효율을 높이기 위하여 이중압력 방식이 채택되었으며, 부하에 따라 주증기압력을 변화시킬 수 있는 가변압증기 발생기이다.

HRSG에서 발생된 증기는 대부분의 경우 배압터빈으로 공급되지만 지역난방의 열수요가 커 배압터빈의 추기 및 배기단으로 열공급이 부족할 경우와 배압터빈이 고장 또는 점검으로 운전을 못할 경우에는 HRSG에서 나온 주증기를 감압, 감온하여 직접 지역난방용 열교환기로 증기를 공급할 수 있도록 설계되어 있다.

다) 증기터빈 발전기

증기터빈은 고압터빈(배압터빈)과 저압복수터빈이 1기의 발전기에 동일축으로 연결되어 있다. 저압복수터빈은 운전중 자동 탈착이 가능토록 고압터빈축에 크러치로 연결되어 있어 동절기 열병합 운전중에는 자동 크러치에 의해 축에서 분리되어 정지시킬 수 있으며, 지역난방 열공급은 고압터빈의 추기 및 배기로 공급하도록 설계되었다.

그러나, 열부하가 극히 낮은 하절기에는 저압복수터빈을 고압터빈에 연결하여 전력 부하 추종운전을 할 수 있으며, 이 때 복수기의 냉각수 공급을 위해 냉각탑이 설치되었으며, 냉각탑 운전에 따른 안개공해 방지를 위해 냉각탑의 형식은 건식/습식이 혼합된 하이브리드(Hybrid) 타입이 채택되었다.

라) 축열조

축열조는 열부하가 낮은 시간에 잉여열을 저장하였다가 열부하가 높은 시간에 저장열을 방출함으로써 일일 첨두부하를 담당하는 열저장 탱크로서 보조 보일러의 부하를 일부 경감시킬 뿐만 아니라 국부적인 열수요의 변화에 효과적으로 대처할 수 있게 한다. 따라서 축열조는 열원설비를 일시적인 열수요 변동에 따라 출력을 제어할 필요없이 효율적으로 연속 운전하는데 크게 도움이 된다.

또한, 축열조는 지역난방 배관망과 연결되어 온도 변화에 따른 온수의 체적변화의 영향을 완화시켜 배관망의 운전압력을 일정하게 유지하는데 도움이 된다.

마) 흡수식 냉동기

흡수냉동기(Absorption Refrigerating Machine)는 1859년 프랑스의 페르디난드와 에문드카레가 작동 원리를 알아낸 것으로 시작되지만 공조용으로 사용된 가장 뚜렷한 발달은 H₂O-LiBr계의 냉매를 채용한 것이다. 이 시스템은 미국에서 1940년대 서벨사에 의해서 중형기가 개발되었고 1945년 캐리어사가 대형기를 개발하여 보급하였다. 1970년대 이후 일본

<표 4> 신도시 열병합 발전소 설비 용량

구 분		안양 열병합 발전소	분당 열병합 발전소	인산 열병합 발전소	부천 열병합 발전소
전기설비	가스터빈	317,600KW (79,400KW×4기)	397,000KW (79,400KW×5기)	420,920KW (105,230KW×4기)	315,690KW (105,230KW×3기)
	증기터빈	160,200KW	201,000KW	210,550KW	157,410KW
	- 고압터빈	(115,200KW)	(144,000KW)	(106,480KW)	(78,980KW)
	- 저압복수터빈	(45,000KW)	(57,000KW)	(104,070KW)	(78,430KW)
열공급설비 (보조열원제외)	전력공급능력				
	- 열병합 운전시	432,800KW	541,000KW	527,400KW	394,670KW
	- 전력만 공급시	477,800KW	598,000KW	631,470KW	473,100KW
	고압열교환기				
저압열교환기	224Gcal/Hr	280Gcal/Hr	162Gcal/Hr	121Gcal/Hr	
열공급능력	224Gcal/Hr	280Gcal/Hr	278Gcal/Hr	208Gcal/Hr	
- 정상적인 열병합 운전시	344Gcal/Hr	430Gcal/Hr	476Gcal/Hr	357Gcal/Hr	
-고압 및 저압증기 터빈 정지시	448Gcal/Hr	560Gcal/Hr	547Gcal/Hr	410Gcal/Hr	
주기공급자	ABB	ABB	WH	WH	

자료출처 : 안양, 분당, 인산, 부천 집단에너지 공급 전기설비 설계기술용역 보고서 한국전력공사 1991. 8.

에서 2중 효용가스 흡수 냉온수기의 에너지 절약화, 소형화 및 개량화 등 그의 특성에 착안한 일련의 기술개발에 따라서 흡수 냉동기가 일본에서 성공을 거두었다.

흡수 냉동기는 기계적인 압축대신 열을 이용하여 시스템을 반복시킨다. 흡수 냉동기는 흡수제-작동매체의 상호작용에 의한 증발 및 응축열을 이용하는 것으로 내부압력을 진공에 가깝게 하므로써 작동매체가 낮은 온도에서 증발할 수 있게 한 장치이다. 열원으로서는 증기 및 온수를 사용할 수 있고 가스를 직접 연소하여 열을 얻을 수 있도 있으며 신도시에서는 온수를 이용한 것으로 상업 및 업무용 빌딩에 혜택 예정이다.

(5) 경제성

우리나라 수도권의 경우 연평균 대기온도가 약12

℃로 난방기간이 짧고, 연평균 열부하율이 25% 정도로 낮아 지역난방 만을 위한 열병합 설비의 경우 고가의 LNG(액화천연가스)를 주연료로 사용할 경우 경제성 확보가 곤란하리라 예상되지만, 본 열병합 설비의 경우 동절기에는 열부하 추종운전을 하고 하절기에는 전기부하 추종운전을 할 수 있도록 특수 설계를 하여 연중 설비 가동율을 80% 이상으로 높이고, 또한 일반 재래식 발전소와 달리 열효율이 아주 높은 가스터빈/증기터빈 복합 발전방식을 택하고 투자비를 최소화 하기 위해 설비를 대형화하기 보다는 저가의 축열조를 설치하여 충분한 예비력 확보와 열부하 변동의 탄력을 흡수할 수 있도록 하는 등 설비를 최적화 시켰으므로, 환경영향 감소를 위해 청정연료인 고가의 LNG를 사용하여도 수용가에 공급하는 열요금은 기존 난방요금보다는 10~20% 낮게 저가로 공급하여도 경제성이 있을 것으로 예상된다.㉔