



저작자표시-비영리-동일조건변경허락 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.
- 이차적 저작물을 작성할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



동일조건변경허락. 귀하가 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공했을 경우에는, 이 저작물과 동일한 이용허락조건하에서만 배포할 수 있습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

工學碩士 學位論文

소형열병합발전의 최적운전 및
효율에 관한 연구



釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金 鐘 逸

工學碩士 學位論文

소형열병합발전의 최적운전 및 효율에 관한 연구

Study on the Optimal Operation and Efficiency for the Small
Scale Cogeneration

指導教授 裴 鍾 一

이 論文을 工學碩士 學位論文으로 提出함

2014 年 2 月

釜慶大學校 産業大學院

電氣工學科

金 鐘 逸

金鐘逸의 工學碩士 學位論文을 認淮함

2013 年 12 月

主審 工學博士 權 聖 烈 (印)

委員 工學博士 崔 然 旭 (印)

委員 工學博士 裴 鍾 一 (印)



목 차

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경	1
1.2 연구 목적 및 필요성	7

제 2 장 본 론

2.1 열병합발전의 분류 및 방식	8
2.1.1 열병합발전의 분류	8
2.1.2 소형열병합시스템의 원리	12
2.1.3 소형 열병합발전 시스템의 구성기기	15
2.1.4 소형열병합시스템의 제어	16
2.2 설비비 및 운전비 산정에 의한 경제성 검토	19

제 3 장 소형열병합발전의 최적운전과 효율

3.1 최적운전을 위한 검토사항	21
3.1.1 전력 및 열에 대한 Heat Balance	21
3.1.2 설비비 및 운전비 산정에 의한 경제성 검토	22
3.2 효율해석	28
3.3 시뮬레이션	30

제 4 장 결론

35

참고문헌

38

표 목차

표 1 국가별 성장 가능성	3
표 2 해외 기업 열병합 관련 기술동향	5
표 3 국내 기업 열병합 관련 기술동향	5
표 4 열병합발전 시스템별 비교	9
표 5 열병합 발전방식 특성 비교	11
표 6 계통연계에 필요한 제어기능	17
표 7 제어기능과 적용기능	18
표 8 열병합발전의 열전비	21
표 9 설비구성	30
표 10 열부하추종 운전시 최적운전모드 상수	34

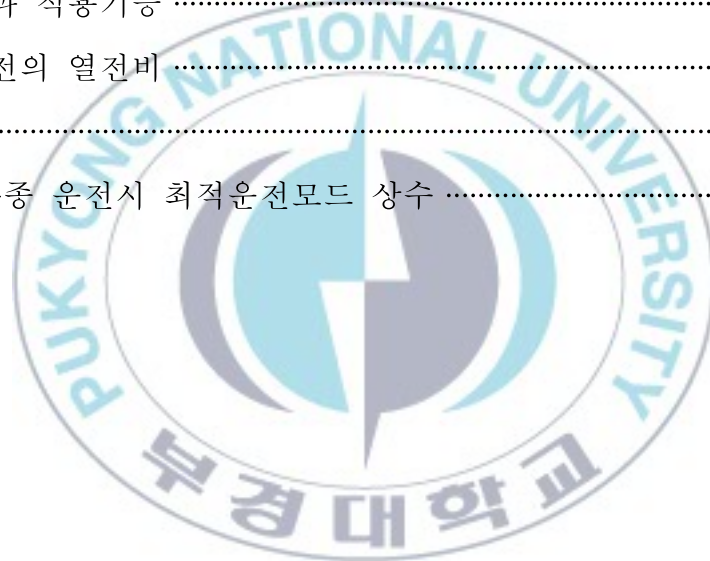


그림 목차

그림 1-1 선진 13개국의 열병합 발전 보급 계획	3
그림 1-2 국내 년도별 열병합발전소 구축 실적 및 계획	4
그림 1-3 소형열병합 발전 기술 현황	6
그림 2-1 열병합발전 시스템의 개념도	12
그림 2-2 공동주택 열병합발전설비의 기본구성	13
그림 2-3 열병합발전 시스템의 일반적인 구성기기	15
그림 2-4 경제성 분석 FLOW	20
그림 3-1 월별가동률 - Case 2	30
그림 3-2 월별 자가발전율 - Case 2	31
그림 3-3 월별 가동율 - Case 3	31
그림 3-4 월별 자가발전율 - Case 3	32
그림 3-5 월별 가동율 - Case 1	33
그림 3-6 월별 자가발전율 - Case 1	33

Study on the Optimal Operation and Efficiency for the Small Scale Cogeneration

Jong-Il Kim

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Industry

Pukyong National University

Abstract

Abstract - This paper studied and inspected, analysed for using methode of small cogeneration system. In the future, this paper will be expected that small cogeneration system can be used as a basic data. Cogeneration system is system that generate an electric power and thermal simultaneously from one source of energy. Recently, Is planing stability about energy consumption and supply and demand which utilize cogeneration system to solve a special problem that is the first energy supply and demand is instability and installation evasion phenomenon of energy production facilities.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

화석 연료의 내재된 에너지 중 대부분이 손실되고 일부분만을 필요한 용도로 사용한다면 막대한 에너지 낭비가 아닐 수 없다. 실제로 전력 산업에서 평균적으로 연료에 내재된 에너지의 약 33%만을 전기로 전환하고 나머지는 폐열로 손실한다. 에너지 낭비 수준은 국가마다 큰 차이가 난다고 할 수 있는데, 오크리지 국립연구소에 따르면 “미국 발전 산업에서 버려지는 열에너지의 양은 일본의 전체 에너지 사용량보다도 많다”고 한다. 이렇게 미국이 낮은 에너지 효율성을 가진 이유는 다양한 기술 분야에서 찾을 수 있다. 예를 들어, 산업 공정에서 사용되는 효율이 낮은 구식 공업용 모터나 펌프, 적은 양의 에너지를 사용하는 신공정이 부재한 제철소, 그리고 단열 개선이 필요한 주거용 건물 등이 있다.

이 가운데 전문가들이 말하는 가장 큰 에너지 효율 개선 효과를 얻을 수 있는 대표 분야는 전력 발전에서 발생하는 열과, 고온의 열을 필요로 하는 공정에서 배출되는 열을 재사용 할 수 있는 열병합 발전 분야이다. 화력 발전소에서 전기 생산을 위해 사용된 연료에 포함된 에너지의 3분의 2가 폐열로 손실되듯이, 일반적인 방법들은 연료를 사용해 열 또는 전기 하나만을 생산한다. 대조적으로 열 병합 발전은 두 가지를 한꺼번에 얻을 수 있다. 열 병합 발전소에서는 연료를 태울 때 나오는 열에너지를 전력 생산에 필요한 스팀 제조, 난방 등의 용도로 다양하게 사용할 수 있다.

에너지를 복합적으로 사용하는 열 병합 발전소는 최대 80~90%의 높은 효율을 자랑한다. 그러므로 현재 무지막지하게 낭비되고 에너지를 줄일 수 있는 열 병합 발전은 기후변화를 막는 새로운 대체 에너지 발전에 이어 또 다른 최고의 방법이다.

열 병합 발전을 이용하는 사례로 도쿄 일부에서는 이 발전을 통해 고층 건물의 냉난방을 모두 해결하고 있고, 핀란드는 전체 지역 난방의 75%를 열 병합 발전을 통해 공급 받고 있으며, 헬싱키는 건물 난방에 필요한 열의 92%를 열병합 발전에서 얻고 있는데 발전양이 많아 종종 남는 전기를 다른 북유럽 국가에 팔기도 한다고 한다. 그 외에도 덴마크, 러시아, 라트비아, 그리고 네덜란드에서는 열 병합 발전을 통해 전기의 30~50%를 생산하고 있다.¹⁾

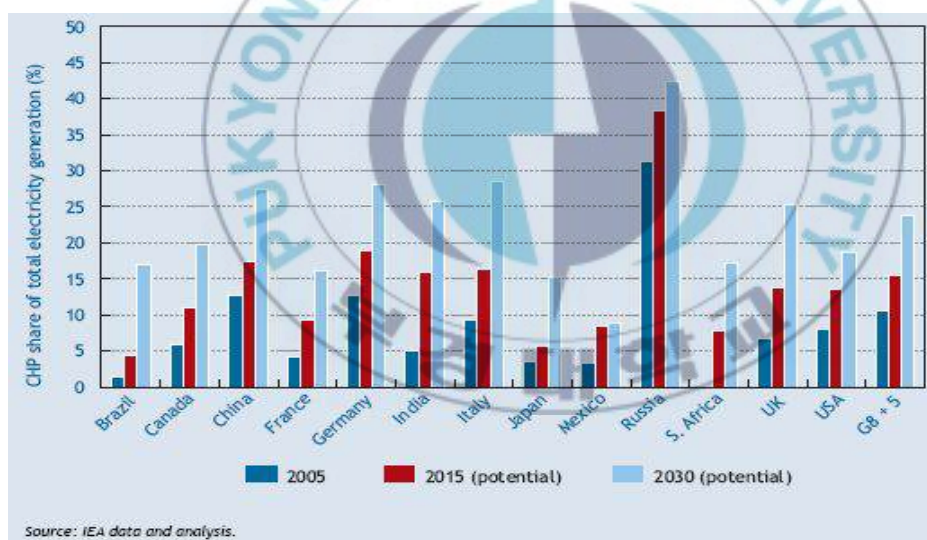


1) 엘고어, 「 Our choice 」 알피니스트, 2010. part 4-1

열병합 발전의 시장현황 및 전망을 살펴보면 해외 선진 13개국은 전체 발전용량에서 열병합이 차지하는 비율을 현재 11%에서 2030년까지 24%까지 확대 할 예정이다. 이러한 추세는 후발국가로까지 확대될 것으로 예상되며, 주요 국가별 열병합 성장 가능성은 아래와 같이 추정된다.²⁾

<표1> 국가별 성장 가능성

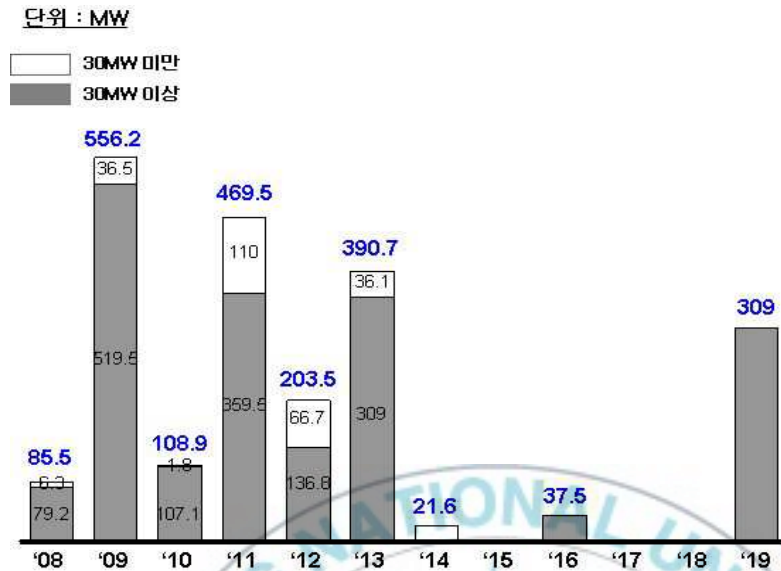
국가	발전용량	목표년도
유럽	150,000 ~ 250,000MW	2025년
캐나다	15,500 MW	2015년
인도	7,500 MW	2015년
일본	29,400 MW	2030년



[그림1-1] 선진 13개국의 열병합 발전 보급 계획

2) Combined Heat and Power-Evaluating the benefits of greater global investment, IEA, 2008.

이러한 추세에 따라 국내 년도별 열병합발전소 구축실적과 그 계획은 아래 그림과 같다.³⁾



[그림1-2] 국내 년도별 열병합발전소 구축 실적 및 계획

해외 기술동향을 살펴보면 선진국은 이미 원동기 및 소형열병합시스템 기술을 선점한 상태로 원동기의 고효율화, 친환경(Zero Emission) 및 내구성 향상을 위한 기술개발을 하고 있고 있으며 후발국가에 대한 기술지배력을 강화하기 위한 마케팅을 추진하고 있다.

국내의 기술동향은 소형열병합시스템 기술은 다수 기업(S사, B사 등)에서 사업 수행을 통하여 기술을 확보하고 있지만 열병합 원동기는 300kW 가스엔진 개발, 55kW 마이크로 가스 터빈 개발을 추진하였을 뿐, 아직까지 개발 원동기가 국내 시장에서 상용화 실적을 확보하고 미비한 실정이다.

3) 제4차 전력수급기본계획, 지경부

해외기업들은 가스터빈의 효율 향상 및 저배기(NOx 저감) 뿐만 아니라 Hybrid 시스템 개발을 위한 연구가 활발히 진행하고 있으며 전력생산 효율 60% 이상을 달성할 수 있는 고온 연료전지(SOFC)-가스터빈 하이브리드형 열병합 발전 시스템 기술 개발을 추진하고 있다.

<표2> 해외 기업 열병합 관련 기술동향

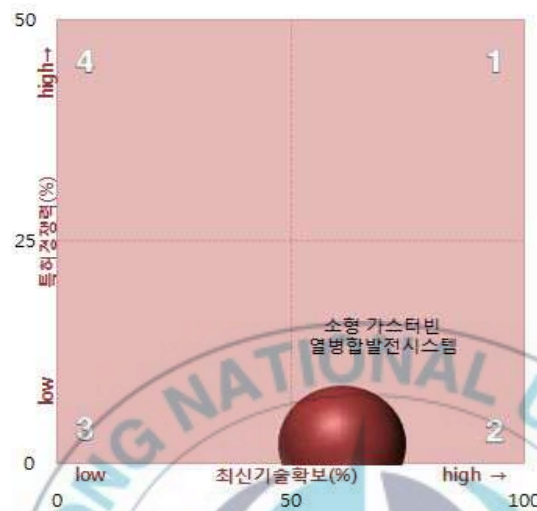
기업명	동향
Rolls-Royce Solar Turbine/ NREC	• SOFC용으로 0.5MW급, 수명 40,000시간, 효율 60% 이상, \$400/kW 목표로 개발 중 • 연료전지 회사들과 공동으로 소형 가스터빈 열병합 시스템 개발 추진 중
Kawasaki(日)	• Micro-Turbine과 소형 가스터빈 시장 공략 • Genset 모델 GPC07D는 가스터빈의 열 생산 능력을 극대화 한 모델로 가스 엔진과 경쟁 중
Allison(美)	• Cheng Cycle을 적용하여 발전 효율을 기존의 28%에서 38%로 대폭 개선 • Nox 배출량 10ppm 저감 성공

선진국은 이미 소형열병합시스템 기술 및 핵심기기인 원동기 기술을 선점한 상태로 원동기의 고효율화, 친환경 및 내구성 향상을 위한 기술개발을 추진하고 있음에 따라 국내의 경우 기업 주도로 기술개발이 진행되고, 일부 원동기는 기술 개발이 완료되었다.

<표3> 국내 기업 열병합 관련 기술동향

기업명	동향
두산 인프라코어	소형 열병합발전용 300kW 가스엔진 개발 완료
(주)뉴로스	55kW 마이크로 가스터빈 개발 및 실증 완료 단계
두산중공업	5MW급 가스터빈은 600억원이상 투자하여 기술개발

핵심구성품(원동기, 폐열회수보일러, 보조기기)에 대한 요소기술개발이 완료단계이나, 아직까지 개발 원동기나 시스템이 국내 시장에서 상용화 실적을 확보하지 못한 실정이다. 따라서 실증단지 구축을 통하여 개발제품의 신뢰성 검증, 표준화 및 사업화 실적을 확보하기 위한 실증시험에 대한 연구가 절실히 요구된다.



[그림 1-3] 소형열병합 발전 기술 현황

우리나라의 소형열병합 기술은 최근 개발이 활발한 편이나 글로벌 기술력 확보를 위한 특허경쟁력이 매우 낮음을 그림 1-3을 통해 알 수 있다. 보유특허의 최신특허 비율은 약 61%, 3극특허비율 : 2% 이다. 그리고 소형 가스터빈 열병합발전시스템 개발기술의 최신기술비중 및 특허 경쟁력은 평균 46%수준이다.

소형가스터빈 Genset Package 기술에 해당하는 특허군은 최신동향과 경쟁력을 모두 갖춘 것으로 나타나며 가스터빈 열병합발전 시스템 실증평가 및 운전기술 / 최적화 통합 설계기술, 가스터빈 열병합발전 통합제어 및 계통연계 기술의 특허경쟁력은 평균수준으로 나타났으나 최신기술 개발은 미흡한 것으로 분석된다.

1.2 연구목적 및 필요성

소형열병합발전설비는 발전에 필요한 투입된 에너지 중 발전 후 버려지는 에너지를 회수하여 온열로 사용함으로써 30% 전후의 발전 효율을 발전효율과 폐열회수 효율을 더한 종합효율이 70~90%가 되게 하는 설비이며, 초기투자비를 고려하여 경제성을 검토한 후 적용 여부를 결정하게 된다.

그러나 공동주택에 적용하는 소형열병합발전설비의 경우에는 에너지비용 즉 전기요금 및 난방용 가스요금 절감을 도모하여 분양성을 높이는 목적으로 설치하게 되므로 초기투자비 회수에 의한 경제성보다도 에너지 비용 절감의 크기가 더 중요하다. 더불어 소형열병합발전설비의 적용은 공동주택의 초고층화, 고급화, 주상복합시설의 증가 등으로 세대의 전력사용량 및 공용전력이 늘어나는 추세에 따라 대형 발전소를 지어야 하는 국가의 부담을 줄일 수 있는 분산형 전원 공급설비이고, 클린에너지의 사용으로 배출가스 오염을 줄이고, 에너지효율 향상으로 에너지 사용량을 줄일 수 있는 친환경설비이기도 하다. 또한 입주자 측면에서는 요금부담의 감소와 더불어 발전폐열을 24시간 연속적으로 사용할 수 있으므로 지역난방방식과 비슷한 연속 난방의 효과와 하절기에도 급탕을 마음대로 사용하는 편의성을 누릴 수 있다. 본 연구에서는 이러한 소형열병합발전설비의 에너지비용 절감량을 위한 최적설치용량 및 효율, 최적운전에 대해 연구한다.

제 2 장 본 론

2.1 열병합발전의 분류 및 방식

2.1.1 열병합발전의 분류

열병합발전시스템은 구성기기, 대응하는 부하, 운전방식 등에 따라 여러 가지로 분류할 수 있으며 주요사항에 대한 분류는 원동기 종류에 따라 증기터빈 방식, 가스터빈 방식, 디젤엔진 방식, 가스터빈방식 방식으로 분류 할 수 있다. 적용형태에 따른 분류하면 산업체 열병합발전, 건물 열병합발전, 사용되는 자가발전 방식과 공업단지 열병합발전, 지역난방, CES에 사용되는 집단에너지 공급방식이 있다.

열병합발전은 넓은 의미로 1차 에너지에서 연속적으로 2종류 이상의 2차 에너지를 발생시키는 시스템이라고 정의할 수 있다. 실제로는 액화석유가스, 천연가스, 석유 등의 연료로 가스터빈방식, 디젤엔진, 가스터빈 등의 원동기를 구동하여 그 동력과 배열을 유효하게 이용하는 시스템으로 전력과 열에너지를 동시에 생산하며, 배열을 효과적으로 이용함으로써 종합에너지 이용효율이 향상(총 효율 80~90%) 한다. 분산형 전원으로 하절기 전력 PEAK-CUT용으로 이용 가능하여 안정된 전력수급에 기여하며 원격지 전력송전에 의한 설비비 및 송전손실 비용을 줄일 수 있다. 전력수급 대책의 하나로 민간의 열병합발전 참여에 의한 전력회사 자체의 신규 발전 설비 소요를 감소시킬 수 있으며 청정연료인 LNG 이용시 이산화탄소 억제 및 환경공해 문

제에 기여 할 수 있는 장점이 있다.

하지만 투자비가 비교적 크고, 시설단위가 전력회사의 기존 발전설비에 비해 매우 작으므로, 화석연료(가스, 유류)를 주로 사용함으로써 향후 연료비의 불확실성, 규모의 비경제에 따른 사업 참여 위험성이 있다고 본다. 또한 열 및 전력수요의 비율이 적절치 않거나, 수요 변동의 불확실성이 클 경우 에너지 이용효율에 의한 이득이 투자비의 자본 회수 소요를 초과할 가능성이 있다. 이에 따라 알맞은 효율과 적정성을 위한 적용의 관점에서의 기술개발 및 연구가 중요하다.

<표4> 열병합발전 시스템별 비교

항목	디젤엔진	가스엔진	가스터빈(마이크로 가스터빈)	비고
연소방식	Spark 점화	Spark 점화	연속 연소	
발전효율(%)	36~43	33	28	
종합효율(%)	-	70~80% 내외	70~80% 내외	전기+가스의 경우 실제 종합효율은 운전조건에 따라 가변적
NOx(ppm)	1000전후	65~300이하	9 이하	환경부 질소산화물 규제
소음(dBA)	95~105	95~100	80 이하	
제품가	저	저	중	
초기투자비용	저	중	중	제품외의 부대설비비용 고려
유지보수 용이성	저	저	고	각 기기의 항목별 유지보수 주기, 횟수가 중요
주용도	비상용	업무용, 주거용	업무용, 주거용	

열병합발전 방식을 열역학적으로 구분하면 랭킨 사이클을 이용한 단순 열병합발전 사이클로 구분된다. 사이클 효율을 증가시키기 위하여 개량한 재열사이클 및 재생재열사이클은 브레이튼 사이클을 이용한 가스터빈의 열병합발전 사이클과 디젤엔진 또는 가스터빈방식 열병합발전 사이클이 있다.

증기터빈방식은 가장 잘 알려진 기술일 뿐만 아니라, 가장 널리 사용되는 방식으로 배압터빈식, 복수터빈식, 조합식으로 대별되며, 터빈에서 팽창하는 도중 증기의 일부를 추기하여 열원으로 사용하는 것으로서 추기 배압터빈식과 추기 복수 터빈식으로 세분할 수 있다.

복합발전방식은 가스터빈 사이클과 증기터빈 사이클은 조합된 열병합발전방식으로 가스터빈으로부터 나오는 고온의 배기가스를 이용하여 폐열보일러에서 생산되는 증기로 증기터빈을 돌리고 팽창과정 중에서 증기의 일부를 추출하여 지역난방 또는 생산공정용 열원으로 사용하는 방식으로 열효율이 높다. 복합발전 열병합발전 방식의 증기터빈은 배압터빈식에 비해 추기복수식이 비경제적이나 적응성이 좋아 추기복수식이 주로 사용된다.

가스터빈 발전방식은 가스터빈은 근래에 고온, 대형화되고 있으며 냉각수가 거의 필요치 않아 열병합발전으로서 채택이 높아지고 있는 추세이다. 가스터빈 열병합발전 방식은 상온의 대기를 흡입하여 연소기에서 고온, 고압의 가스로 만들어 터빈을 돌린 다음 고온의 배기는 대기에 배출하게 되는데 이때의 65~75% 정도가 되는 다량의 배기손실을 회수하여 증기 또는 온수를 생산하고 이를 지역난방 또는 생산

공정의 열원으로 이용하고 있으며 소형열병합발전에 적합하다.

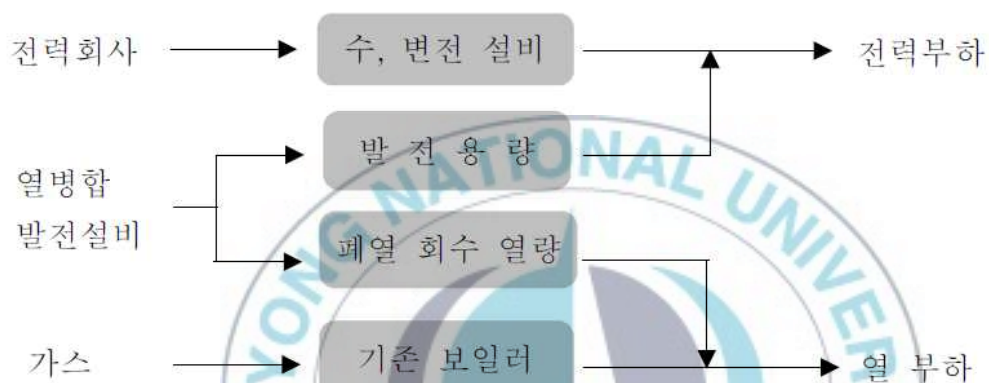
가스터빈방식은 전기/증기비가 높기 때문에 전기수요가 열수요보다 상당히 많은 곳에서의 사용이 이상적이다. 온수로 열생산을 할 경우는 전체 효율이 높지만 증기만 생산할 경우 효율이 저하된다. 원동기별 특성비교는 표5와 같다.

<표5> 열병합 발전방식 특성 비교

항 목	디젤엔진	가스엔진	가스터빈
출력범위(kW)	~ 10,000	~ 1,000	300 ~ 10,000
열전비	1.0	1.0 ~ 1.5	2.0 ~ 3.0
발전효율(%)	35 ~ 45	30 ~ 35	20 ~ 35
종합효율(%)	80 ~ 90	80 ~ 90	75 ~ 90
사용연료	A중유, 경유	가스	가스, A중유, 경유
NO _x 배출량	대	중	소
장단점	발전효율이 높다 진동, 소음이 크다	배기가 깨끗하다 열회수가 용이하다	배기가 깨끗하다 진동, 소음이 작다 열전비가 크다

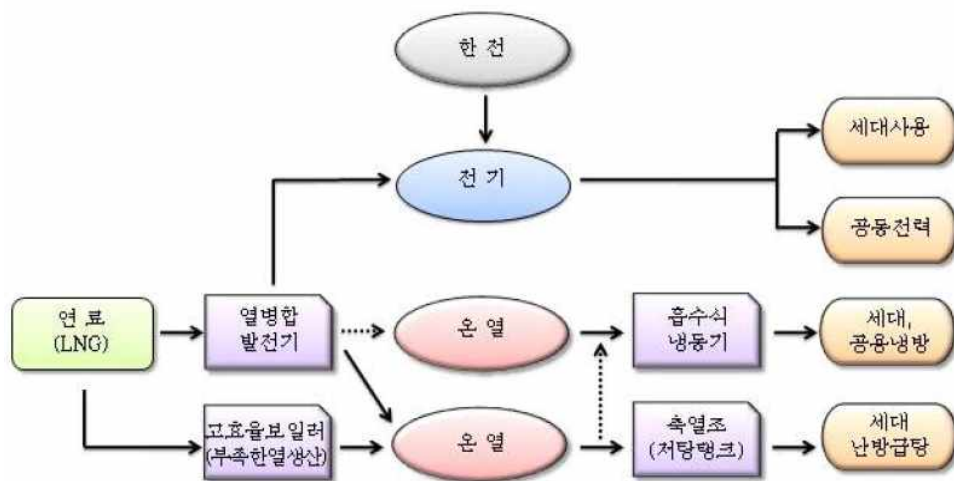
2.1.2 소형열병합시스템의 원리

소형열병합은 주로 천연가스를 연료로 발전용량이 10MW 이하인 가스터빈 또는 가스엔진 등을 이용, 열과 전기를 동시에 생산하여 이용함으로써 기존의 화력발전, 열전용 보일러 시스템 조합보다 에너지 효율을 약 30% 증가시킬 수 있는 고효율 종합에너지 시스템을 말한다.



[그림 2-1] 열병합발전 시스템의 개념도

소형 열병합발전설비의 기본구성은 그림2-2 와 같고, 연료공급설비, 원동기, 발전기, 열 교환기 또는 폐열보일러, 보조열원, 배출시설, 전력연계시설 등 용도나 여건에 따라 적절히 조합구성 되며 필요에 따라 축열조 또는 저장탱크를 둘 수 있으며 배기가스를 직접 흡수식냉동기에 이용하여 냉방을 할 수 도 있다



[그림 2-2] 공동주택 열병합발전설비의 기본구성

열병합발전설비를 설치하는 시설의 전력부하와 열부하가 열병합발전설비의 전력량, 열 발생량과 일치하지는 않는다. 이에 따라 경제적인 운전을 위하여 열병합발전설비는 대상 시설의 전력부하를 추종하여 운전하는 전력부하 추종 운전방식이나 열부하에 추종하여 운전하는 열부하 추종 운전방식 중 선택하여 운전하게 된다.

열부하 추종 운전방식은 배열량이 많고 열부하가 상시 많을 경우 열부하에 따라 가동하고 생산된 전력 중 시설에 사용되고 남은 전력은 외부에 매전하거나 폐기되어 열효율은 상승하나 전력효율은 저하될 우려가 있다.

전력추종 운전방식은 전력부하에 따라 발전설비를 가동하고 발생하는 폐열을 회수하여 온열에 이용하게 되며 부족한 열은 보조열원을 가동하고 남은 경우에는 폐기하게 되므로 발전효율은 증가하나 폐열

효율은 저하하게 된다.

소형열병합발전의 경우 공동주택의 적용 경우가 높으므로 한국전력 전력요금단가의 누진제로 인하여 많은 전력을 사용할 경우 높은 단가의 전력을 사용해야하므로 이것을 완화해야 전기요금을 절감할 수가 있고, 열은 기온과 시각에 따른 편차가 크지만 전력은 상대적으로 편차가 작기 때문에 기본적으로 전력부하 추종 운전방식이 유리하다.

전력부하 추종 운전방식은 발전기를 가동하여 기본전력을 사용하고 부족할 경우 한국전력전기를 사용한다. 이 때 발생한 배열은 회수하여 열로 사용하고 부족할 경우 보조열원을 가동하며 남은 경우 폐기된다. 폐기될 열은 축열조 또는 저장탱크를 적절히 설치하여 저장하여 이용하면 열효율을 높일 수가 있다.



2.1.3 소형 열병합발전 시스템의 구성기기

소형 열병합발전 시스템의 주요 구성기기는 원동기, 발전기, 제어기기 및 배열이용기기 등으로 구성된다. 또한 실제 구성 기기에는 발전기반, 보조반, 방열장치, 시동장치 등 각종 주변기기도 포함되며 발전 출력이나 배열 이용과 보완관계에 있는 상용전력계통이나 보조열원 기기 등도 포함된다. 그림 3은 열병합발전 시스템의 일반적인 구성기기를 개념도를 나타내고 있다. 그림에서 원동기가 기동하여 발전기에 동력을 전달 한 후 배기가스는 배열 이용기기를 통하여 열부하에 열을 공급한다. 또한 발전기에서 생산된 전력은 발전기반을 통하여 계통이 분리가 된 경우 에는 부하에 직접 전력을 공급하고 상용전력과 계통연계의 경우에는 계통 연계반을 거쳐 부하에 전력을 공급한다. 이러한 구성기기 중 원동기, 발전기, 제어기기, 배열이용기기에 대하여 그 내용을 보면 다음과 같다.



[그림 2-3] 열병합발전 시스템의 일반적인 구성기기

2.1.4 소형열병합시스템의 제어

소형열병합발전 시스템의 제어는 소형열병합발전 시스템 자체가 전력과 열을 동시에 공급하는 에너지원이고 보조 에너지원으로서 계통 전력으로부터 전력공급과 보일러에 의한 열 공급 기능을 가지는 복잡한 형태일 경우가 많다. 그리고 소형열병합발전 시스템 도입의 주요 목적이 에너지 비용의 절감에 있으므로 소형열병합발전 시스템의 운전 제어 시스템을 구축함에 있어서 에너지 수급 정보의 일원화와 관리정보에 근거한 설비의 계획적인 운용을 도모할 수 있도록 기능을 구성할 필요가 있으며 도입하는 규모나 에너지 수급의 위치 등을 고려하여 합리적인 하드웨어 및 소프트웨어를 구성하여야 할 필요가 있다.

소형열병합발전 시스템의 운전 제어는 운전상황의 감시나 각각의 운전 데이터를 계측 수집하여 에너지 수급정보로 관리하는 실적처리 그리고 이 데이터를 근거로 운전계획, 보수 계획을 각 설비의 개별적인 제어로 연계하여 실시하는 기능과 밀접하게 관련을 갖고 있다.

<표6> 계통연계에 필요한 제어기능

제어 기능	기능
발전기 운전제어	발전기의 시동 및 정지
동기 투입 제어	상용전력과 발전기의 연계/동기 투입
유효 전력 제어	상용전력과 발전기의 부하 분담
무효 전력 제어	발전기의 무효전력/역률 제어
이상보호 분리제어	상용전력 및 발전기 이상 시의 보호, 분리제어
부하 선택 차단	상용전력 또는 발전기 이상 시의 부하 선택 제어

제어기능에 따라 제어장치와 제어기기는 표7과 같이 적용할 수 있다. 제어기기의 시스템 구성은 발전기 제어반, 자동 동기반, 직류 전원반, 상용전원/수전반, 수전보호계전기반, 모선 연결반, 원격제어감시반 등이 있다.

<표7> 제어기능과 적용기능

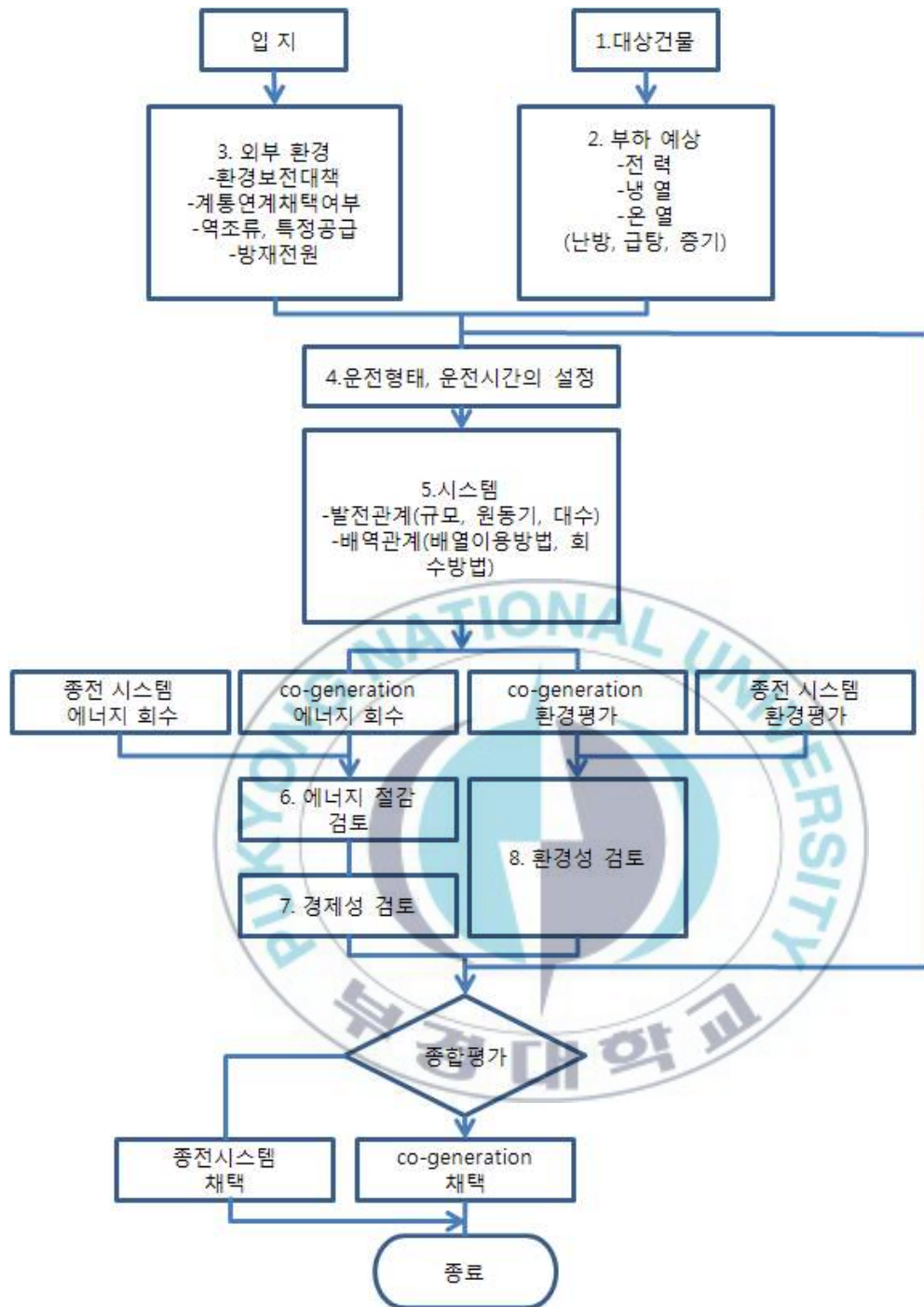
제어 기능	제어 장치	제어 기기
발전기 운전 제어	발전기의 자동 시동 및 정지 장치	시동장치 전기시동, 공기시동
동기 투입 제어	자동동기 검정장치 동기검정, 조속, 전압평형	원동기 가버너 발전기 AVR
유효 전력 제어	자동전력 조정장치	원동기 가버너
무효 전력 제어	자동역률 조정장치	발전기 AVR
이상보호 분리제어	보호 계전기	원동기 정지장치, 차단기
부하 차단	보호 계전기	차단기

2.2 설비비 및 운전비 산정에 의한 경제성 검토

경제적인 열병합발전을 위한 계획은 어떻게 배열을 유효하게 이용하는가가 중요한 점이 된다. 열병합발전이 가지고 있는 열 부하를 우선으로 하여 발전용량을 결정하는 것이 좋다. 통상 호텔, 병원 등은 건물의 전력용량의 30~40[%]를 열병합발전으로 충당하고 배열을 충분히 회수(80%정도)하는 것이 경제적인 시스템이 된다.

부하의 특성에 따라 전력 수요에 맞추어 운전할 것인가 또는 열 수요에 맞추어 운전할 것인가, 기저 부하용으로 할 것인가 또는 첨두 부하저감(Peak Cut)용으로 할 것인가, 전력계통으로부터 수전하는 방식으로 할 것인가 등, 운전방식의 선택도 경제성에 중요한 영향을 주게 된다. 시스템을 도입하기 위한 경제성분석은 그림 8에서와 같이 대상건물에 대한 예상부하(전력 및 열) 조사와 외부환경조건(환경영향, 계통연계, 역조류, 방재 등)을 병행 하여 조사한 후 운전형태 및 운전시간을 선정하고 시스템의 규모를 선정한다.

시스템선정이 완료되면 중전시스템과 열병합발전 시스템을 종합평가하여 경제성이 없으면 중전시스템으로 채택하고 경제성이 있으면 열병합발전 시스템으로 채택 한다.



[그림 2-4] 경제성 분석 FLOW

제 3 장 소형열병합발전의 최적운전과 효율

3.1 최적운전을 위한 검토사항

소형 열병합발전 시스템 도입시 최적운전을 위한 검토사항으로는 전력 및 열에 대한 균형, 설비비 및 운전비 산정에 의한 경제성 검토, 설치장소 및 제어방식, 환경관련법 등을 검토하여야 하며 그방법을 제시한다..

3.1.1 전력 및 열에 대한 Heat Balance

소형열병합발전은 배열을 어떻게 유용하게 이용하는가가 제일 중요한 문제이므로 열병합발전에 대한 최적수요는 열부하가 크게 하고 가동시간이 긴 경우가 좋다.

사용 되는 열과 전기와의 비율을 열전 비라고 식1과 같이 값을 도출하며 표8은 가스엔진과 가스터빈의 열전 비를 비교한 표이다.

$$\text{열전비} = \frac{\text{공급가능 열에너지}(kcal/h)}{860(kcal/h) \times \text{발전전력}(kcal/h)} \quad (\text{식1})$$

<표8> 열병합발전의 열전비

시스템	열전비	효율
Gas 엔진발전	50/30≒1.7	발전효율 : 20~30[%] 열 회수효율 : 50[%]
Gas 터빈발전	50/20≒2.5	

3.1.2 설비비 및 운전비 산정에 의한 경제성 검토

경제적인 열병합발전을 위한 계획은 어떻게 배열을 유효하게 이용하는가가 중요한 점이 된다. 열병합발전이 가지고 있는 열 부하를 우선으로하여 발전용량을 결정하는 것이 좋다. 통상 호텔, 병원 등은 건물의 전력용량의 30~40[%]를 열병합발전으로 충당하고 배열을 충분히 회수(80%정도)하는 것이 경제적인 시스템이 된다.

부하의 특성에 따라 전력 수요에 맞추어 운전할 것인가 또는 열 수요에 맞추어 운전할 것인가, 기저 부하용으로 할 것인가 또는 첨두 부하저감(Peak Cut)용으로 할 것인가, 전력계통으로부터 수전하는 방식으로 할 것인가 등, 운전방식의 선택도 경제성에 중요한 영향을 주게 된다.

시스템을 도입하기 위한 경제성분석은 그림 8에서와 같이 대상건물에 대한 예상부하(전력 및 열) 조사와 외부환경조건(환경영향, 계통연계, 역조류, 방재 등)을 병행 하여 조사한 후 운전형태 및 운전시간을 선정하고 시스템의 규모를 선정한다.

시스템선정이 완료되면 중전시스템과 열병합발전 시스템을 종합평가하여 경제성이 없으면 중전시스템으로 채택하고 경제성이 있으면 열병합발전 시스템으로 채택 한다.

3.1.3 열병합 발전기실 및 발전기 용량

열병합발전 시스템은 상용발전설비이기 때문에 비상용 예비전원장치와는 구별되고 그 용량에 관계없이 발전소로서의 취급을 받는다. 이 때문에 발전소 시설로서의 설치상 제약이 따른다(전기사업법에 기초한 전기설비에 관한 기술기준을 정하는 법령). 또한 발전설비를 설치하는 장소의 구조에 대해서는 소방법에 기초한 소방법 시공규칙 및 화재예방조례 등에 의해 규제되는 것이 된다.

이와 같이 열병합발전의 설치에 대해서는 전기사업법 및 소방법상의 법적인 규제가 있어서 이들 규제조건을 만족하기 위해 기본적으로는 다음과 같이 발전기실을 계획한다.

- ① 발전기를 설치하는 장소는 기계실과 별실의 전용실로 한다. 출입구에는 출입금지 표시를 하고 시건장치 등을 설치한다.
- ② 발전기실은 불연 재료로 화재를 방지할 수 있도록 한다.
- ③ 발전기실 내에는 발전 이외의 용도로 제공하는 덕트 수관 기타의 설비가 설치 또는 관통되지 않도록 한다. 단 배기가스 보일러 배기가스열교환기 배열회수열교환기 등에 대해서는 발전설비의 부대설비이기 때문에 발전기실 내의 설치에 대해서는 별도 협의에 의해 결정된다.
- ④ 발전기실에는 옥외로 통하는 환기장치를 설치한다.⁴⁾

4) 박광도, 「小型 熱併合發電 System의活用 方案」, 嶺南大學校, P30~34.

발전기 용량 산정방법(출력계수 RG 법)은

1) 정상부하 출력계수[RG_1]

$$RG_1 = \frac{1}{\eta_L} \cdot D \cdot S_1 \cdot \frac{1}{\cos\theta_g} \quad (\text{식2})$$

$$\eta_L = \frac{K}{\sum \frac{m_i}{\eta_i}} : \text{부하의 총합효율}$$

m_i : 각 부하기기 출력[kW]

η_i : 당해 부하의 효율

K : 부하의 출력 합계[kW]

D : 부하의 수요율

$$S_f = \sqrt{1 + \frac{\Delta P}{K} + \frac{\Delta P^2}{K^2} + (1 - 3u + 3u^2)} : \text{불평형 부하에 의한 선전류의 증가계수}$$

$\Delta P = A + B - 2C$: 단상부하 불평형분 합계 출력치 [kW], 3상 각상 사이에 단상부하 A, B, C 출력치[kW]가 있고 $A \geq B \geq C$ 인 경우

$$u = \frac{A - C}{\Delta P} : \text{단상부하 불평형 계수}$$

$\cos\theta_g$: 발전기의 정격역률

2) 허용전압강하 출력계수[RG_2]

$$RG_2 = \frac{1 - \Delta E}{\Delta E} \cdot xd'g \cdot \frac{ks}{Z'm} \cdot \frac{M_2}{K} \quad (\text{식3})$$

ΔE : 발전기단 허용 전압 강하

$xd'g$: 부하투입 시에 대한 전압강하를 평가한 임피던스

ks : 부하의 시동방식에 의한 계수

$Z'm$: 부하의 시동시 임피던스

M_2 : 시동 시의 전압강하가 최대가 되는 부하기기의 출력[kW]

모든 시동 입력 값을 계산하여 그 값이 최대가 되는 것을 M_2 로 한다.

K : 부하의 출력합계[kW]

3) 단시간 과전류 내력 출력 계수[RG_3]

$$RG_3 = \frac{fv_1}{KG_3} \left\{ \frac{d}{\eta_b \cdot \cos\theta_b} \left(1 - \frac{M_3}{K} \right) + \frac{ks}{Z'm} \cdot \frac{M_3}{L} \right\} \quad (\text{식4})$$

$$= \frac{fv_1}{KG_3} \left\{ \frac{d}{\eta_b \cdot \cos\theta_b} + \left(\frac{ks}{Z'm} - \frac{d}{\eta_b \cdot \cos\theta_b} \right) \frac{M_3}{K} \right\}$$

fv_1 : 순시 주파수 저하, 전압강하에 따르는 투입 부하감소 계수

$fv_1 = 1 - \frac{fv}{P} \left(\frac{M_3}{K} \right)^n$, $fv = 0.4$, $P = 4$, $n = 3$ (극수 4P, 가스 엔진의 경우)

KG_3 : 발전기의 단시간(15초) 과전류 내력

d : 베이스 부하의 수용률

η_b : 베이스 부하의 효율

$\cos\theta_b$: 베이스 부하의 역률

ks : 부하의 시동 방식에 따르는 계수

$Z'm$: 부하의 시동 시 임피던스

M_3 : 단시간 과전류 내력을 최대로 하는 부하기기의 출력[kW]

모든 시동입력[kVA] - 정격입력[kVA] 값이 최대가 되는 부하의 출력[kW]을 계산하여 그 값이 최대가 되는 것을 M_3 로 한다.

K : 부하의 출력 합계[kW]

4) 허용 역상 전류에 따른 출력계수[RG_4]

$$RG_4 = \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{KG_4} \sqrt{\sum \left(\frac{R_i \cdot h_i}{\eta_{vi} \cos\theta_i} \right) + \left(\frac{\Delta P}{\eta_\phi \cdot \cos\theta_\phi} \right)^2 (1 - 3u + 3u^2)} \quad (\text{식5})$$

K : 부하의 출력 합계[kW]

KG_4 : 발전기의 허용 역상 전류에 따른 계수

R_i : 고조파 발생 부하의 정격출력[kW]

h_i : 해당 부하의 고조파 발생률 (해당 부하 기기가 발생하는 고조파 전력을 등가 상전류로 환산하는 계수)

η_{vi} : 해당 부하 효율

$\cos\theta_i$: 해당 부하 역률

ΔP : 단상 부하 불평형분 합계 출력치[kW]

삼상 각 선 사이에 단상 부하 A, B, C의 출력치[kW]가 있고

$A \geq B \geq C$ 의 경우 $\Delta P = A + B - 2C$

η_ϕ : 각 단상 부하 효율

$\cos\theta_\phi$: 각 단상 부하 역률

$u = \frac{A-C}{\Delta P}$: 단상 부하 불평행 계수

5) 발전기 출력계수 RG 의 결정

RG 는 $RG1, RG2, RG3, RG4$ 의 값이 최대의 것으로 한다.

$RG = \max (RG1 \ RG2 \ RG3 \ RG4)$



3.1.3 효율해석

본 소형열병합시스템의 효율을 시뮬레이션하기 위하여 시스템이 정상상태에 도달하기 까지 충분히 예열을 가정한 후, 연료의 사용량과 시스템으로 유입되는 난방수의 온도변화, 그리고 발전기를 통해 생산되는 전력량을 시스템의 열효율, 발전효율, 전체 효율을 계산한다.

$$Q_{H_2O} = \dot{m} c_p (T_o - T_i) \quad (\text{식6})$$

Q_{H_2O} = 디젤엔진의 배기가스의 폐열과 엔진자체의 열을 회수한 총열량

$\dot{m}$ = 시스템으로 유입되는 냉수의 유량

c_p = 시스템으로 유입되는 냉수의 비열

T_i = 난방수의 입구 온도

T_o = 난방수의 출구 온도

시스템의 열효율은 다음과 같이 계산된다.

$$\eta_{th} = \frac{Q_{H_2O}}{Q_{diesel}} \times 100\% \quad (\text{식7})$$

Q_{diesel} 은 발전기를 통하여 생산되는 전력량에서 후처리장치의 니크로프선의 열선에서 소요되는 전력량의 차이 값이다.

열병합시스템의 전체효율(η_{total})은 열효율과 발전효율의 합은 다음 식과 같다.

$$\eta_{total} = \frac{Q_{H_2O} + Q_{elect}}{Q_{diesel}} \times 100\% \quad (\text{식8})$$



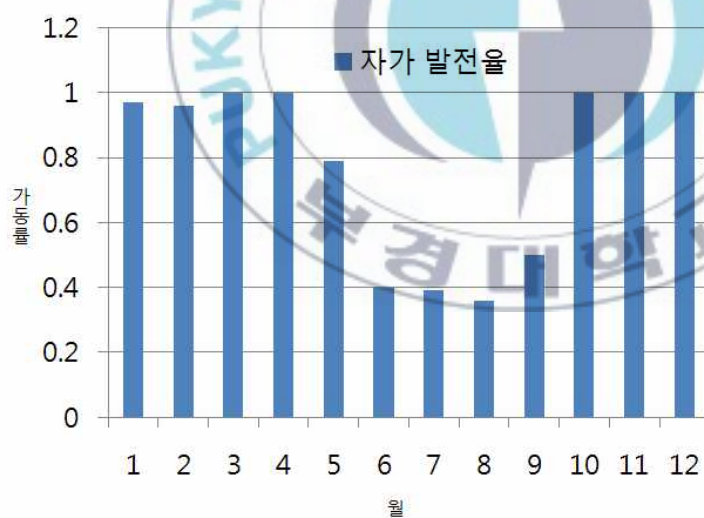
3.1.3 시뮬레이션

공동주택을 가정한 소형열병합발전을 열부하추종으로 가정하여 앞서 도출된 발전용량 및 효율을 적용한 운전 시뮬레이션을 해본다.

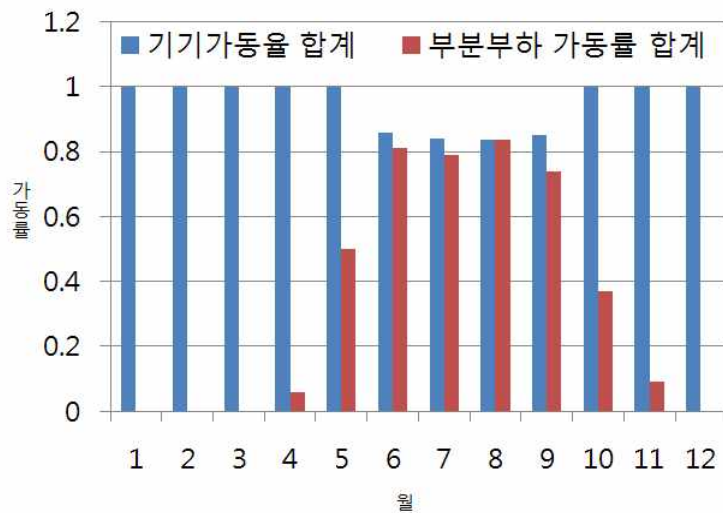
<표9> 설비구성

	용량	장치부하[%]	기기부하[%]	대수
Case 1	1000kW	30	86	1
Case 2	600 kW × 2	40	99	2
Case 3	700 kW × 2	45	92	2

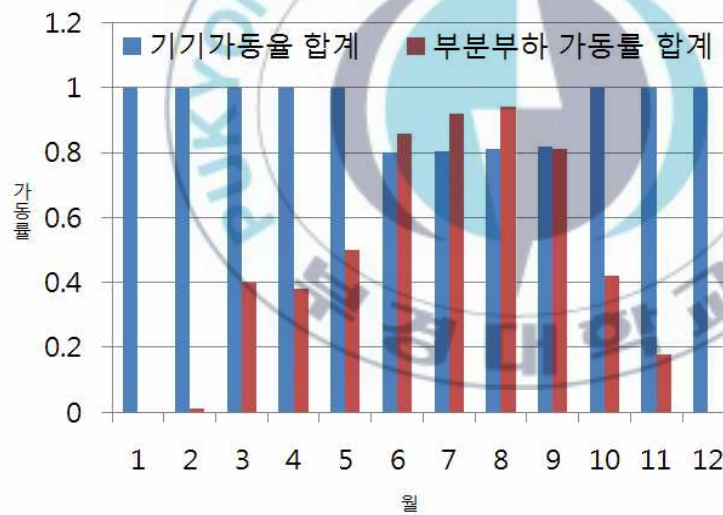
설비용량이 큰 구성 Case 2, 3에 대한 각 인자별 월별 분포를 정리하면 다음과 같다.



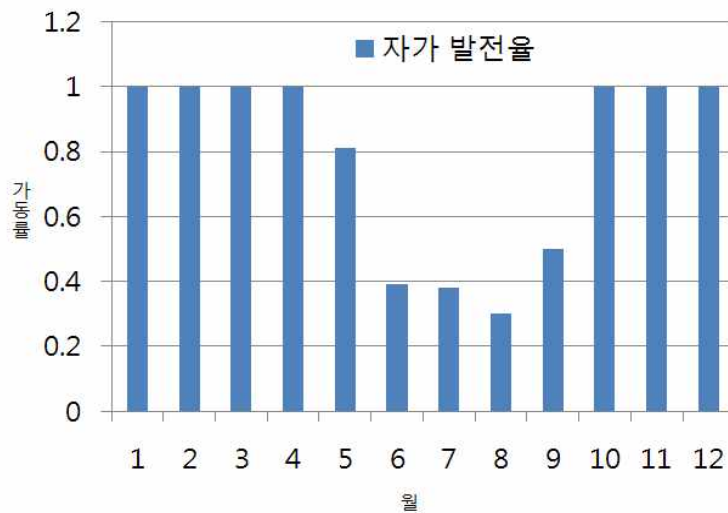
[그림3-1] 월별가동률 - Case 2



[그림3-2] 월별 자가발전율 - Case 2

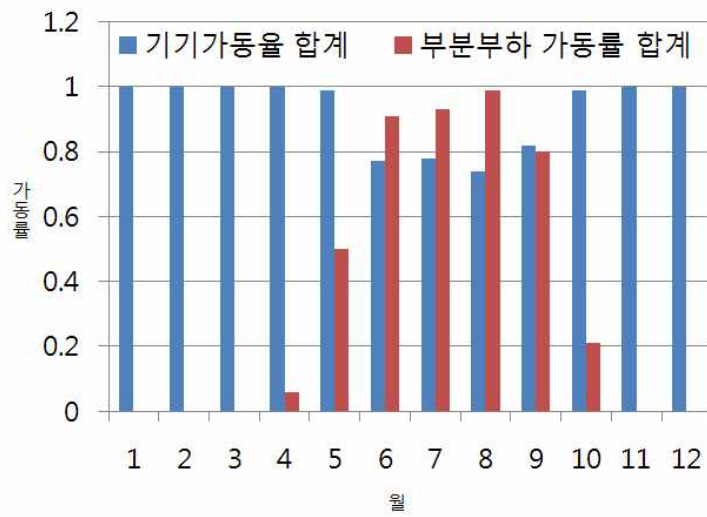


[그림3-3] 월별 가동율 - Case 3

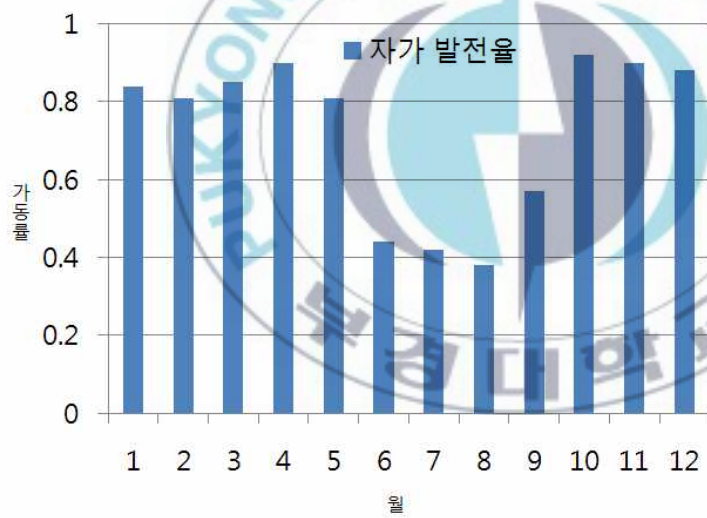


[그림3-4] 월별 자가발전율 - Case 3

수요처의 큰 전력수요량으로 인해 비교적 큰용량의 경우에 대해서도 경제성을 어느 정도 확보 가능한 상황이지만 일반적으로 바람직한운전모드로 보기에 는 무리가 있다. 따라서 경제성 측면에서 위험성이 적은 Case 1에 대한 각 인자별 월별 분포를 정리하면 다음과 같다.



[그림3-5] 월별 가동율 - Case 1



[그림3-6] 월별 자가발전율 - Case 1

상기 분석결과를 바탕으로 최적 운전모드와 관련한 주요 인자들에 대한 값을 제시하면 다음과 같다.

<표10> 열부하추종 운전시 최적운전모드 상수

상수	평균전력사용량	α	β	γ
K	360 [kWh]	80 (이상)	40 (이하)	80(이하)

실제 수요처의 다양한 부하 특성을 감안할 때 상기 결과에서 제안된 수치가 모든 일반적인 경우에 공통으로 적용된다고 보는 것은 타당하지 않다. 다만 본 연구에서는 공동주택에 대한 최적운전모드와 관련하여 사용자가 실제 운영방식과 대비하여 손쉽게 참조, 비교할 수 있는 기준 데이터를 제공하는데 목적을 두고 있음에 유의하기 바란다. 최적 운전모드와 관련한 일반화된 수치에 대해서는 추후 보다 많은 사례에 대한 분석 및 연구를 통한 검증 작업이 수행되어야 할 것이다.

제 4 장 결 론

열병합발전은 1차 에너지의 효율적 이용을 위한 방안 중 하나로 우리나라와 같이 자연자원이 절대 부족한 나라에서는 각광을 받고 있다. 특히 사계절이 뚜렷한 기후특성에 영향을 받고 있는 우리나라의 산업 현장과 빌딩 및 아파트군 에서는 전기와 열부하가 동시에 요구되고 있다. 계절의 영향이 뚜렷한 하절기 냉방부하는 우리나라 발전 시설에 대단히 큰 부담을 주고 있다. 향후 우리나라의 경제성장에 따른 중장기 에너지수요전망을 예측하여 볼 때 천연가스 등 청정에너지의 수요는 더욱 확대 되어 질 것이고 이에 따른 전력수요도 대폭 크게 증가될 것이다.

본 논문에서는 청정에너지의 수요 확대와 이에 따른 전력수요의 증대에 따른 에너지 수입국으로서의 대처방안의 일환으로 소형 열병합발전 시스템을 연구대상으로 상정하여, 이에 관련한 국내외의 기술적인 상황을 면밀히 분석하여 소형 열병합발전 시스템의 활용 방안에 대한 필요성과 특징 그리고 구성기기 등에 대하여 분석하고, 나아가 소형 열병합발전 시스템을 실제 적용시 필히 검토하여야 할 사항을 경제적 관점에서 논하였다. 더불어 본 연구의 결과들이 향후 소형 열병합발전 시스템 활용에 따른 기초자료로 활용 되어 질것으로 생각된다.

이하 소형열병합발전의 필요성을 요약정리 하면 다음과 같다.

- (1) 소형 열병합발전 시스템을 채용 할 경우 1차 에너지 소비는 화력 발전 시스템에 비하여 35[%] ~ 45[%] 절약이 가능 하고 초기투자원가는 장거리 중앙집중식 열 공급시스템보다 30 ~ 50[%] 작다.
- (2) 전력과 열의 종합적인 유효이용률이 높고, 재해시나 비상전원시 설로사용이 가능하다.
- (3) 에너지의 합리적 이용으로 수입에너지 절약에 크게 기여 할 뿐만아니라, 열펌프, 냉동기 등과 조합하여 사용이 가능하다.
- (4) 최대전력저감 수단으로 사용이 가능하다.
- (5) 천연가스 등의 사용으로 CO2배출량을 크게 감소시킬 수 있어 친환경적인 발전 시스템이다.

이상의 결과로부터 소형 열병합발전 시스템은 경제적인 시설투자, 에너지의 효율적 이용으로 인한 경제적 이익, 환경배출물의 감소 등 그 시너지 효과가 큰 종합에너지 이용시스템으로 앞으로 우리나라의 에너지절약 및 환경 보전 수단으로 주요역할을 하게 될 것으로 기대된다.

특히 환경문제와 관련하여 유럽의 경우 기후변화협약 대응방안으로 열병합 발전을 확대.보급하고 있으며 원자력 및 일반 화력발전소 건설을 회피하고 있는 점을 감안할 때 우리나라도 보급이 확대 될 전망

으로 생각 된다.

본 연구의 시뮬레이션 및 기타 기준에 근거한 값과의 차이가 발생할 개연성을 있으나 일반적인 정상적인 운전을 가정할 때 상당히 신뢰성 있는 결과를 제시할 수 있다는 가능성을 확인할 수 있다 사료 되어 진다. 추후 보다 많은 연구를 통해 기준지표 확립과 부가적인 요인들을 감안하여보다 신뢰성 있는 데이터를 제시 할 수 있을 것으로 기대한다.⁵⁾



5) 임용훈, “소형열병합발전 시스템 최적운전 지표 개발”, 한국에너지기술연구원, 대한설비공학회, 2010. P 523~528.

참고 문헌

- [1] 손학식, “열병합발전시스템”, 기다리출판, 2005
- [2] 박화춘 외, “소규모 지역냉난방 시스템 시뮬레이션 개발”, 2004
- [3] 임용훈 외, ‘소형열병합발전 최적시스템 구축 및 운영기준(안) 연구’, 에너지관리공단, 2008
- [4] 임용훈, “소형열병합발전 시스템 최적운전 지표 개발”, 한국에너지기술연구원, 대한설비공학회, 2010.
- [5] 손학식 “실용 소규모 열병합발전시스템”기다리
- [6] 이종성, 김종엽(2006). “아파트단지의 소형열병합발전시스템 경제성 평가프로그램” 설비저널 제35권 제11호
- [7] Tina M. Kaarsberg, Joseph M. Roop, “Combined heat and power:How much carbon and energy can manufacturers save?”, IEEE AES systems magazine, 7-11, 1999
- [8] Christian Schulz, Gerold Roder, Michael Kurrat, “Virtual power plants with combined heat and power micro-units”, Future power and systems 2005 international conference on, 16-18, 2005
- [9] S.Ashok, Rangan Banerjee, “Optimal operation of industrial cogeneration for load management”, IEEE trans. on power system, Vol. 18, 931-937, 2003

감사의 글

회사업무 에 따른 이론적 부족함을 느끼던 중 산업대학원 석사 과정에 입학하여 이론적으로 부족했던 여러 가지 부분들을 보충할 수 있었으며 정제 되어 있던 제 자신을 한걸음 더 나아 갈 수 있었던 소중한 시간이었습니다. 학업과 일을 병행해야 하는 어려움과 회사업무로 인해 힘이 들 수 있었던 논문이 완성되기 까지 많은 도움과 격려가 있었기에 이렇게 좋은 결실을 맺고 졸업을 할 수 있었다고 생각합니다. 특히 부족한 저를 세심한 지도와 조언 그리고 배려로 이 자리까지 올 수 있게 해주신 평생의 스승이신 지도교수 배종일 교수님의 은혜에 고개 숙여 깊은 감사를 드리며 바쁜 일정 속에서도 논문 심사를 위하여 귀중한 시간을 할애하여 열과 성의로 저의 초라한 논문을 심사해 주신 권성열 교수님 , 최연욱 교수님에게도 머리 숙여 감사를 드립니다. 그리고 논문이 나오기까지 많이 고민하고 연구하여 여러 방면 에서 많은 도움을 준 심창수 조교님께도 고마운 마음을 전하고 싶습니다. 학업과 업무의 병행이 쉬운 일이 아님을 이해하고 많은 격려와 도움의 말씀을 주신 회사 선후배님에게도 감사의 마음을 같이 전하고 싶습니다. 직장생활에 학업을 병행하느라 제대로 살피고 도와주지 못한 집안일을 묵묵히 하며 헌신적으로 내조해 준 사랑하는 아내 화정, 그리고 재물을 피워 힘을 나게 해준 우리 딸 예림이 에게 사랑한다는 말과 함께 이 기쁨을 같이 전하고 싶습니다.

2013년 12월

김 종 일