

지역난방 공급온도의 변화가 열병합발전 에너지소비량에 미치는 영향에 관한 연구

정찬교

수원대학교 환경공학과

A study on the temperature of District Heating System related to Energy Consumption of Combined Heat & Power

Chan Kyo Chung

Department of Environmental Engineering, Suwon University

요 약

본 연구는 지역난방용 열병합발전시스템의 열에너지 이용을 최대화하므로서 1차에너지의 소비량을 감소시키는데 그 목적이 있으며, 이를 위한 한가지 방안으로 열추종 운전범위내에서의 온도에 따른 지역난방 운전방법을 분석검토하였다. 운전가능한 지역난방 공급 및 회수온도에 따른 지역난방 운전방법을 분석검토하기 위하여 수치해석 프로그램 CHPSIM을 사용하여 열병합발전시스템의 열적상태와 열추가소비량을 계산하였다. 지역난방의 온도수준을 120/65°C 에서 95/40°C로 저하시킴 으로서 연간 열추가 소비량을 24.7% 감소시킬 수 있으며, 90/40°C로 저하시키면 29.6%의 절약이 가능하다.

Abstract— The purpose of this study is to maximize utilization of thermal energy in the operation of combined heat & power system for district heating. A comparative analysis of district heating operational modes in relation to temperature has been performed within the operational range of the heating load. Using a simulation program CHPSIM, thermodynamic properties and additional heat expenditure(AHE) of combined heat & power system were computed for the comparison of the different district heating operational supply- and return-temperatures. Within lowering of district heating temperature-level from 120/65°C(supply/return) to 95/40°C can reduced the AHE 24.7% yearly and within lowering to 90/40°C 29.6%.

1. 서 론

경제성장과 더불어 에너지수요가 증대되고 있어 부존자원이 빈약한 우리경제에서는 에너지 이용합리화 및 원천적인 에너지 절약사업으로서 뿐만 아니라 택지, 발전소 건설계획등 개발계획 및 공해방지대책과 효과적으로 연계시켜 열병합발전 및 지역난방사업이 추진되고 있다. 또한, 집단에너지 공급기본계획(90.8)에 따르면 열병합발전을 이용한 지역난방의 보급율을 2001년에는 총 주택수의 15% 수준으로 공급체계의 확

기적 확대를 목표로 기후조건, 주택밀집도, 열생산시설과의 거리등을 감안하여 일정규모 이상의 신규개발지역과 기존 주거밀집지역에 대한 적극 도입을 추진하고 있다.

열병합발전 및 지역난방의 역사가 깊은 유럽의 기술개발동향은 시스템의 근본적인 대체방법이 연구되는 한편 기존기술을 토대로 현재의 시스템에 대한 연구 개발도 아울러 병행되고 있으며, 국내의 열병합발전 및 지역난방사업의 역사는 비교적 짧으므로 아직 외국 기술도입의 의존도가 높고 차후 발생되는 보수문제 등

여러가지 제반사항의 문제 등이 제기될 것이다. 특히 현재 외국으로 부터 도입된 지역난방 시스템은 유럽의 2차측 난방시스템을 기준으로 설정되어 있어, 이에 대한 타당성 연구가 필요한 실정이다. 유럽의 2차측 난방시스템은 대류난방방식으로 공급 및 회수온도의 설계치가 90/70°C 인 반면 국내의 2차측 난방방식은 대부분 복사난방방식인 바닥난방으로서 공급 및 회수온도의 설계치가 60/45°C 으로서 난방방식과 설계 온도면에서 유럽의 난방시스템과 현격한 차이가 있다. 국내 난방방식에 적합한 지역난방시스템을 검토하기 위해서는 열원인 열병합발전시설, 열운반시설, 열수용가시설을 종합적으로 고려하여야 한다.

본 연구에서는 이에 대한 기초연구로서 언급한 3가지 시설중 열병합발전을 대상으로 선택하였으며, 열병합발전의 에너지 소비량에 미치는 여러 영향인자중 지역난방 목적으로 추출되는 열의 상태에 따른 영향력이 가장 크므로, 지역난방 공급온도의 변화에 따른 열병합발전시스템의 입열량 변화를 분석하였다. 대상 열병합발전시스템은 열부하추중 시스템으로 현재 국내에 주로 적용되고 있는 배압터빈시스템을 선정하여 실제 설계자료를 이용하였으며, 난방부하 또한 실제자료를 활용하였다. 한편 지역난방과 지역냉방을 겸한 시스템의 경우 별도의 고찰이 필요하므로 본 연구에서는 지역난방만을 목적으로 한 시스템을 대상으로 하였다.

2. 평가방법

열병합발전시스템은 열전용플랜트나 일반 복수발전시스템과는 달리 하나의 시스템으로 부터 에너지 수준이 상이한 전기와 열에너지를 발생시키므로 일반 발전시스템에 적용시키고 있는 기존의 평가방법을 이용할 경우 타당성이 저하되므로 열추가소비량(AHE : Additional Heat Expenditure)을 이용하여 평가하여야 한다.

열추가소비량은 전기와 열에너지를 동시 발생시킬 경우와 이 두 종류의 에너지를 각각 복수발전과 열전용플랜트에서 발생시킬 경우를 비교하여 입열량의 차이로 산출된다.

$$AHE = Q_{\text{req}}(P, Q_{\text{H}}) - Q_{\text{cond}}(P)$$

열추가소비량 AHE 는 일정량의 전기 P 를 발생시키는 일반 복수발전의 입열량 Q_{cond} 과 열병합발전시 이와 동일한 양의 전기 P 와 난방열 Q_{H} 를 발생시킬 경우의 입열량 Q_{req} 의 상대적 비교로 산출되며, 전자의 경우 난방열을 발생시키기 위한 입열량은 Q_{H} 와 동일하다고 가정한다. 따라서 일정한 열병합발전의 열

추가소비량을 산출하기 위해서는 이에 상당하는 전기출력을 발생시키는 가상복수발전의 입열량도 동시에 계산되어야 한다. 가상복수발전 시스템은 열병합발전 에 준하여 설계조건과 부분부하운전시의 입열량 및 전기출력을 산출하여 수식으로 표현할 수 있으며, 이와 같은 경우 입열량과 전기출력은 비례하므로 부분부하중 소수의 포인트만 계산하면 필요한 수식을 성립시킬 수 있다. 한편 난방열을 열병합발전에 의하여 발생시킬 경우, 난방열을 발생시키기 위한 입열량, 즉 열추가소비량은 발생하는 난방열의 일부분에 불과한데 이의 관계를 열추가소비지수 b_{AHE} 로 나타낸다.

$$b_{\text{AHE}} = \frac{AHE}{Q_{\text{H}}}$$

열추가소비지수는 여러종류의 단일 열병합발전의 열역학적 효율을 비교 평가하기에 적합하며, 열병합발전으로 인하여 절감되는 1차에너지량도 나타낼 수 있다.

외기온도에 따른 수용가측 난방부하의 부분부하는 지역난방수의 온도를 일정하게 유지하며 유량을 변화시키는 정온도 변유량 방식으로 배관망이 운전되거나 이의 반대방식인 변온도 정유량 방식으로 운전된다. 열병합발전 시스템에 변수로서 작용하는 지역난방 공급온도의 영향을 분석하기 위하여 부분부하시의 배관망은 정온도 변유량방식으로 운전하고 이와 같은 부분부하 운전형태를 유지하며 공급온도와 공급온도 및 회수온도의 차이를 변화시키므로써 공급온도에 따른 열병합발전의 입열량을 비교할 수 있다. 종합적인 결과를 얻기 위하여는 정격부하뿐만 아니라 부분부하시의 운전상태도 고려한 연간 운전치를 적용하여 분석하여야 하므로, 난방부하의 연간누적곡선을 이용하여 각 외기온도별 난방부하를 규정하여야 한다. 한편 수치해석시간을 단축하기 위해서 각 외기온도는 인위적 난방일(synthetic day)과 이에 해당하는 난방부하, 공급 및 회수온도, 난방수 유량을 도입하여 사용하면 편리하다.

3. 수치해석모델

열병합발전은 다양한 시스템 구성요소들이 복합적으로 연결되어 있으며, 각 구성요소별로 각종의 변수가 작용하므로 일정변수의 변화가 각 구성요소에 미치는 영향 또는 최종적으로 입열량에 미치는 영향을 분석하기는 용이하지 않으며 많은 시간을 요한다. 지역난방 공급온도 역시 이와 같은 변수중의 하나이며 공급온도가 열병합발전 시스템의 각종 구성요소를 거쳐 최

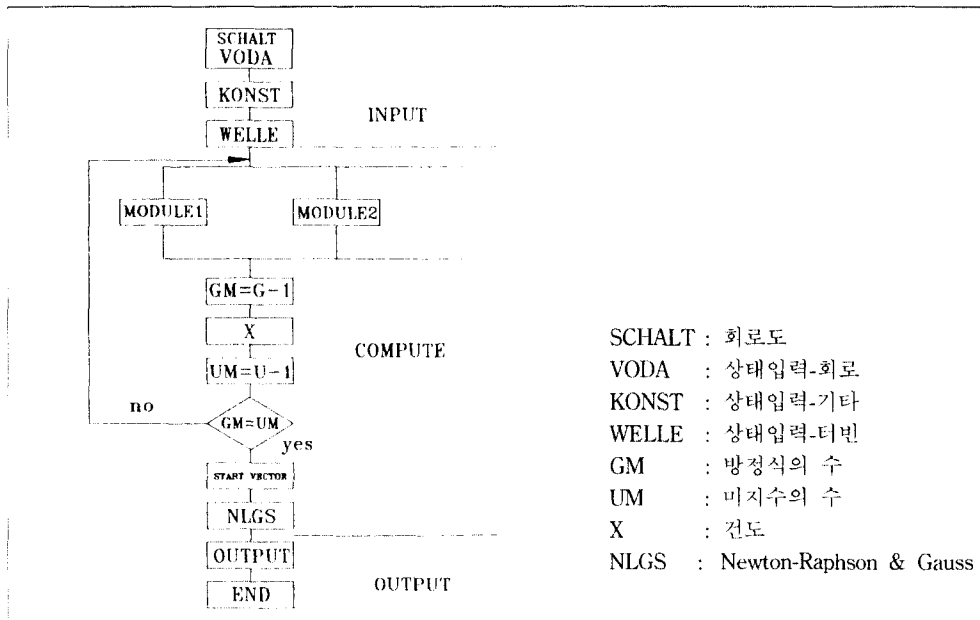


Fig. 1. CHPSIM Program Flow Chart.

종적으로 입열량에 미치는 영향을 종합적으로 분석하기 위해서는 이에 적합한 수치해석 프로그램이 필요하다.

본 연구에 적용된 수치해석 프로그램 CHPSIM은 Chung⁶⁾에 의해서 개발된 프로그램으로서 모듈식 구성과 동시계산방법을 택하고 있다. 일반적으로 사용되고 있는 프로그램은 발전시스템의 구성요소의 접속방법과 수치해석의 순서가 고정되어 있는 관계로 발전시스템의 간단한 변경도 프로그램의 변경을 불가피하게 하므로, 이와 같은 불편과 전문인력의 낭비를 제거하기 위하여 하나의 프로그램으로 다양한 발전 및 열병합발전 회로를 해석할 수 있는 유연한 수치해석 프로그램이다. 모듈식 구성이란 열병합발전의 모든 구성요소별 물리적 관계를 비선형적 수식으로 각각 모듈로서 저장되어 있으므로 적용대상 회로에 필요한 구성요소의 모듈을 접속방법의 순서에 상관없이 각각 사용할 수 있음을 의미하며, 이러한 수식은 유량, 엔탈피, 터빈 및 펌프의 단일상태변화 및 부분부하상태를 나타내는 상태식 등으로 구성되어 있다. 한편 반복계산과정에서 작업매체의 상태변화를 고려하여야 하므로 이에 필요한 증기 및 가스 table 이 내장되어 있다. CHPSIM의 입력과 계산, 출력과정을 간단히 도시하면 Fig. 1과 같다.

4. 결 과

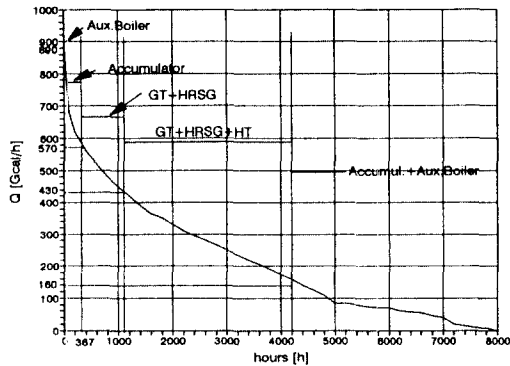
4-1. 열병합발전 시스템

본 연구의 대상 열병합발전 시스템은 증기를 매체로 하여 열부하 추종운전에 이용되는 배압터빈 시스템으로 외기온도의 변화에 따라 발생하는 난방부하를 충족시키기 위한 난방열 발생을 주 목적으로 하므로 열병합발전에 의해서 발생하는 전기출력의 제어는 자유롭지 못하다. 그러나 대상 열병합발전은 Fig. 2에 도시된 바와 같이 부분부하시 추기복수운전도 가능하므로 추기복수운전이 가능한 부분부하범위내에서는 배압터빈과 추기복수터빈의 운전에 따른 비교 검토도 행하였다. 지역난방 배관망은 각 단일의 공급관과 회수관으로 형성된 2관시스템이며, 배관망의 운전방법은 공급온도와 공급온도 및 회수온도의 차이에 따라 열병합발전에 미치는 영향을 분석하기 위하여 운전기간중 변화하는 난방부하를 지역난방수 유량의 변화를 통하여 충족시키는 장온도 변유량 운전방식을 선택하였다. 난방부하 발생시 지역난방수는 Fig. 2에 도시된 바와 같이 저압터빈(Turbine 14)의 운전이 정지된 상태로 2개의 열교환기를 직렬연결한 난방복수기에 의해서 가열되며, 난방부하가 없을 경우에는 복수발전에 의해서 전기만 발생된다. 대표적인 설계자료는 다음과 같다.

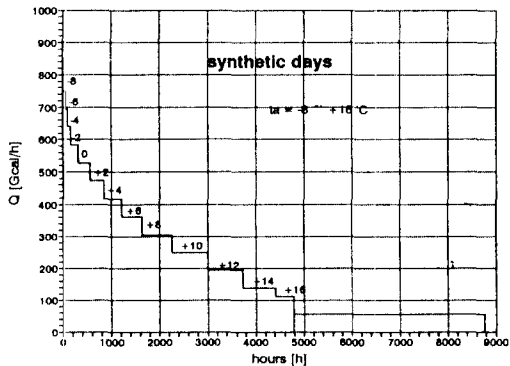
| | |
|-----------|------------------|
| 최대 발생증기유량 | 766 t/h |
| 발생증기상태 | 60.5 bar, 490 °C |

Table 1. Synthetic day.

| synthetic day [°C] | amb. Temp. [°C] | duration [°C] | heating Load | |
|-----------------------|--------------------|------------------|--------------|-------|
| | | | [Gcal/h] | [MW] |
| -8 | -12 ... -7 | 66.2 | 751 | 873.4 |
| -6 | -7 ... -5 | 26.7 | 695 | 808.3 |
| -4 | -5 ... -3 | 73.8 | 640 | 744.3 |
| -2 | -3 ... -1 | 153.3 | 584 | 679.2 |
| 0 | -1 ... 1 | 240.0 | 528 | 614.1 |
| 2 | 1 ... 3 | 286.7 | 473 | 550.1 |
| 4 | 3 ... 5 | 373.3 | 417 | 485.0 |
| 6 | 5 ... 7 | 420.0 | 362 | 421.0 |
| 8 | 7 ... 9 | 613.3 | 306 | 355.9 |
| 10 | 9 ... 11 | 746.7 | 250 | 290.8 |
| 12 | 11 ... 13 | 733.3 | 195 | 226.8 |
| 14 | 13 ... 15 | 680.0 | 139 | 161.7 |
| 16 | 15 ... 17 | 373.3 | 111 | 129.1 |
| 18 | 18 ... | 3973.3 | 55 | 64.0 |



a) annual heating load duration curve



b) curve a) prepared for synthetic days

Fig. 3. Annual heating load duration curve & synthetic days.

병합발전시의 입열량과 가상복수발전시의 입열량의 차이로 산출되므로 복수발전시의 입열량도 동시에 계산되어야 한다. 복수발전의 부분부하시 전기출력의 변화에 따른 입열량은 언급된 CHPSIM 이 일반복수 발전에도 활용이 가능하므로 이를 이용하여 산출되었다. 수치해석 결과로서 복수발전의 부분부하시 입열량과 전기출력은 Fig. 4와 같이 선형적 관계를 나타내므로 관계식을 열병합발전 수치해석시 프로그램 내에 입력하면 열추가소비량의 동시계산이 가능하다. 그러나 이 관계식은 대상회로에 따라 일정치 않으므로, 열병합발전의 부분부하 계산 전에 동일 프로그램을 이용한 수치해석의 결과로 선형식을 도출하여야 한다.

열병합발전의 부분부하 운전방법은 배압터빈과 추기복수터빈 방식이 가능하며, 추기복수터빈 방식의 경우 난방복수기의 압력제어와 비제어방식이 일반적으로 이용되고 있으나 본 연구의 대상회로의 경우 난방복수기와 터빈이 직접연결되어 있으므로 압력제어방식은 제외된다. 부분부하에 따라서 배압터빈과 추기복수터빈의 비제어방식을 운전방법으로 선택하여야 하므로 이에 대한 사전분석이 필요하다. 지역난방의 운전방법은 정온도, 변유량 방식으로 공급 및 회수온도는 120/65°C로 설정하여 대상범위내의 각 외기온도별 열병합발전의 부분부하상태를 분석하였다. 배압터빈방식의 경우 전 부분부하의 운전이 가능하나, 추기복수방식의 경우 난방부하가 적은 범위에만 운전이 가능하고 외기온도가 10°C 이하인 경우에는 열

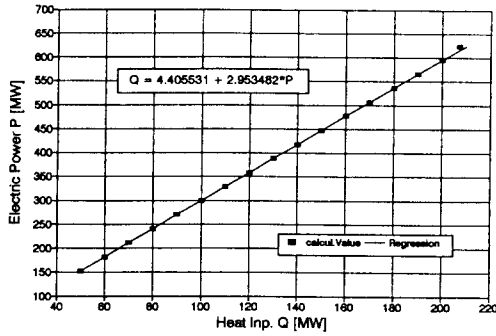


Fig. 4. Heat expenditure of condensation process.

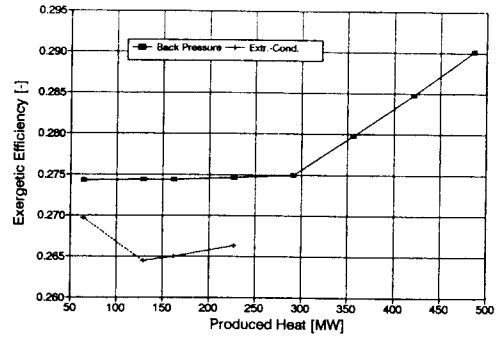


Fig. 6. Exergetic efficiency by back-pressure and extraction-condensing mode.

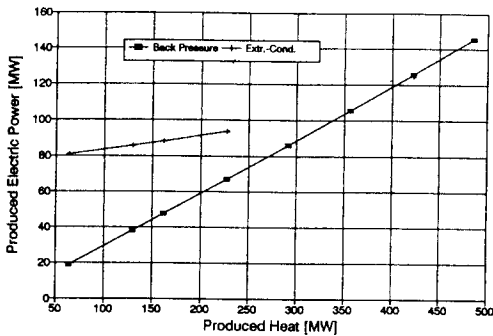


Fig. 5. Produced electric by back-pressure and extraction-condensing mode.

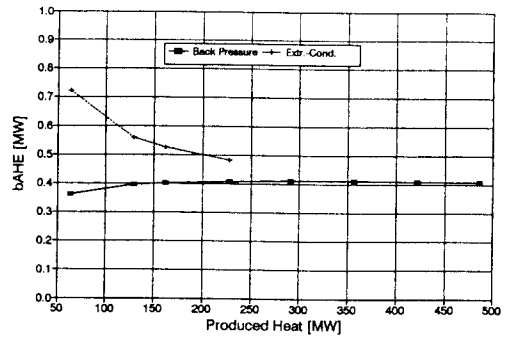


Fig. 7. Relative AHE by Back-Pressure and Extraction-Condensing Mode.

병합발전용량을 초과하므로 운전이 불가능하므로 이 범위내에서 비교분석한 결과는 다음과 같다.

발전전력은 Fig. 5 와 같이 추가복수방식의 경우 배압터빈방식에 비하여 높게 나타나지만, Fig. 6 의 엑서지 효율과 Fig. 7 의 열추가소비지수를 비교하면 배압터빈방식이 추가복수방식에 비하여 엑서지 효율이 높고, 열추가소비지수가 낮으므로 지역난방의 공급 및 회수온도에 따른 열병합발전의 영향을 분석하기 위한 운전방법으로 전 부분부하 범위에 배압터빈방식을 적용시킨다. 지역난방 운전방법중 120/65°C인 경우를 중심으로 적용된 수치해석 프로그램 CHPSIM의 활용성을 나타내면 다음과 같다.

열병합발전 시스템을 열추중방식의 배압터빈으로 운전하면 팽창된 증기가 저압터빈을 통과하지 않고 직접 지역난방용 열교환기에서 응축되므로 발생열과 발전량간에는 일정한 선형관계가 형성되는데, 이와 같은 관계는 Fig. 5 에 도시된 바와 같이 나타난다. 분석대상 열부하범위내에서의 엑서지효율 변화의 범위는 0.274~0.29로 비교적 적지만 Fig. 6과 같이 열 부하가 증가할수록 엑서지효율이 증가함을 나타내므로 일반적인 이론과 일치되고 있다.

열병합발전 상태에 지역난방수의 온도가 미치는 영향에는 공급 및 회수온도의 차이를 유지한 상태에서 지역난방수의 온도를 저하시키는 방법과 온도차이를 감소시키는 방법으로 분류하여 분석할 수 있다. 전자의 경우 분석된 공급 및 회수온도는 120/65, 110/55, 95/40°C로 분류하였으며, 후자의 경우 120/65, 115/65와 95/40, 90/40°C로 분류하였다.

각 부분부하시의 종합적인 결과로 도출되는 열추가소비지수를 지역난방의 각 운전방법에 따라 Fig. 8에 도시하였다. 각 지역난방 운전방법에 따른 부하별 경향의 차이는 발생하지 않으나, 난방부하가 저부하일 경우 열추가소비지수가 일반적으로 낮게 나타나므로 배압터빈방식을 적용한 열병합발전에서는 열역학적으로 유리함을 알 수 있다.

지역난방수의 온도차이가 일정한 경우 온도에 따른 정압비열의 영향을 무시하면 지역난방수의 유량은 지역난방 운전방법에 상관없이 일정하지만, Fig. 8 에 도시된 바와 같이 열병합발전에서 온도에 따른 열추가소비량에 미치는 영향은 공급온도가 저하될수록 유리함을 알 수 있다. 지역난방 운전방법을 120/65°C에서 95/40°C로

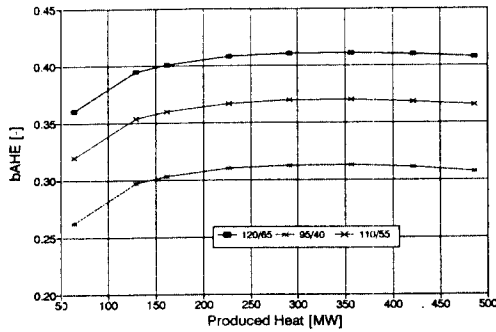


Fig. 8. Relative AHE at different district heating temperatures.

변환시킬 경우 난방부하의 약 10%에 해당하는 입열량을 절약할 수 있다. 지역난방수의 온도차이를 120/65에서 115/65°C로, 95/40에서 90/40°C로 5°C 저하시킬 경우 난방부하의 약 2%에 해당하는 입열량을 절약할 수 있으며, 120/65°C의 운전방법을 90/40°C로 변환시키면 약 12%의 입열량이 감소된다.

이상의 각 지역난방 운전방법에 따른 열추가소비량의 변화는 각 부분부하의 열추가소비량을 용량으로 나타내고 있으며, Fig. 9에 도시된 바와 같이 실질적으로 연간 운전시간동안에 발생하는 연간 열추가소비량과 이에 따른 연간 절약량의 절대량은 경제성 분석에도 활용될 수 있다. 지역난방 운전방법을 120/65°C에서 95/40°C로 변환시키면 지역난방수 유량의 변동없이 연간 열추가소비량을 24.7% 감소시켜 112759MWh의 입열량을 절약할 수 있으며, 90/40°C로 변환시키면 29.6%에 해당하는 135167MWh를 절약할 수 있다.

5. 결 론

지역난방용 열병합발전시스템의 열에너지 이용을 최대화하므로써 1차에너지의 소비량을 감소시키기 위한 한가지 방안으로 열추종 운전범위내에서의 온도에 따른 지역난방 운전방법을 분석검토하였다. 운전가능한 지역난방 공급 및 회수온도에 따른 지역난방 운전방법을 분석검토하기 위하여 수치해석 프로그램 CHPSIM을 사용하여 열병합발전시스템의 열적상태와 열추가소비량을 계산하였다. 지역난방의 온도수준을 120/65°C에서 95/40°C로 저하시킴으로써 연간 열추가소비량을 24.7% 감소시킬 수 있으며, 90/40°C로 저하시키면 29.6%의 절약이 가능하다. 따라서 증기를 작업매체로 사용하며 발생하는 난방부하를 추종운전하기 위한 배압터빈 열병합발전시스템의 경우 지역

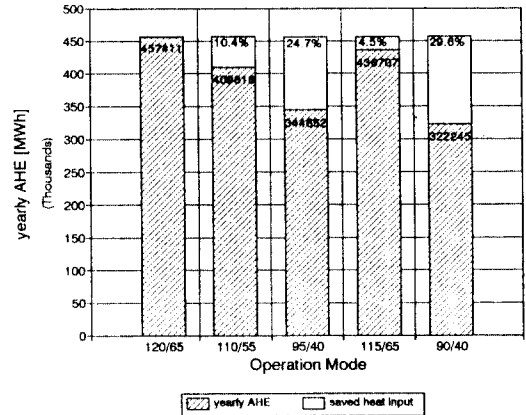


Fig. 9. Yearly AHE at different district heating temperatures.

난방수의 공급 및 회수온도와 공급 및 회수온도의 차이를 저하시킴으로써 1차에너지의 소비량을 감소시킬 수 있다. 그러나 이와 같은 결과는 지역난방 공급 및 회수온도가 열원인 열병합발전기에 미치는 영향에 해당되며, 지역난방 공급 및 회수온도의 최적조건을 도출하기 위해서는 열원뿐만 아니라 열운반시스템 및 열수용가시설을 포함한 종합적인 분석이 지속되어야 하겠다.

본 연구의 결과와 유사한 결과가 발표된 해외연구로서 독일의 경우 연구결과를 일부 시험구역에 적용하여 1차측의 공급 및 회수온도를 110/70°C에서 90/60°C로, 2차측은 90/70°C에서 80/50°C로 저하시킴으로써 열병합발전측 전기출력의 증가, 온도의 저하로 배관재의 변경이 가능하여 배관재 및 토목공사비의 저하, 열손실 감소로 1992년도에 2,870,000 DM을 절약하는 효과를 볼 수 있었으며, 덴마크의 경우 기존의 공급온도보다도 낮은 90/78°C에서 보다 더 저하된 온도 60/44°C를 적용하므로써 시험구역내에서 약 23%의 에너지를 절약할 수 있었다. 이외에도 지역난방방식을 채택하고 있는 유럽의 여러국가에서 공급온도에 대한 연구가 진행되고 있으나, 국내의 경우 지역난방의 역사가 짧은 관계로 이에 대한 연구실적은 미비하나 지역난방의 보급율이 증가함에 따라 장차 공급온도뿐만 아니라 전반적인 기초연구가 필요하다.

참고문헌

1. 동력자원부: "집단에너지 공급기본계획" (1990)
2. 정관교: "복합 열병합발전 운전방법에 관한 연구", 수원대학교 산업기술연구소 논문집, 8, pp.165 (1993).

3. 한국지역난방공사: 『열사용시설기준』 (1992).
4. 정찬교: “열추가소비지수를 이용한 증기열병합발전의 평가”, 한국에너지공학회 학술발표논문집 (1992).
5. 한국지역난방공사: “열원설비 공정설계 및 운전모드” (1991).
6. Chung,C.K.: Dr.-Ing. Dissertation, Technical University of Berlin, Germany (1990).
7. Mathenia, Th.: “Heizkraftwerke zur Fernwärmever
sorgung”, BWK, **42**, pp.319 (1990).
8. Zöllner, G. and Chung, C. K.: “Rechnerische Simulation von Heizkraftprozessen als Instrument zur Parametervariation und Optimierung”, FWI, **18**, pp. 466. (1989)
9. Winkens, H. P.: “Wirtschaftliche Vorlauftemperaturen in der Fernwärmeverversorgung”, FWI-Year Book, pp.17 (1988).