비상을 고려한 다지역 지역난방 설계

손홍록, 이규황, 이인범
포항공과대학교 화학공학과

Design of Multi-Site District Heating Network with Emergency Scenarios

Hongrok Son, Kyu Hwang Lee, In-Beum Lee
Department of Chemical Engineering, POSTECH

서론

지역 난방이란 일정지역 내에 있는 주택 및 건물에 개별적으로 난방 설비를 갖추는 대신 집중된 대규모 열원시설을 건설하여 경제적으로 생산된 열을 이용하여 지역 전체를 동시에 난방열 및 급탕열로 일괄 공급하는 합리적인 에너지 관리 방식을 말한다[5]. 지역 난방을 실시할 경우 효율이 높은 열병합 발전을 사용하여 연료 사용량을 감소시킬 수 있으며 노후시설 교체비용 및 시설 보수 유지 비용이 절감된다. 또 공해 방지 시설의 집중 관리로 환경 개선 효과가 있다.

지역 난방에 사용되는 주 열원 시설로 열병합(Combined Heat and Power, CHP) 발전소, 열전용 보일러, 쓰레기 소각로 등이 있다. 연료를 사용해 열에너지 만을 생산하는 열전용 보일러에 비해 열병합 발전소는 동일한 연료를 사용하여 열과 전기를 동시에 생산한다[3]. 따라서 열병합 발전에 의해 생산된 전기는 전력 시장의 개방됨에 따라 다른 곳으로 판매할 수 있다.

현재 지역 난방은 스웨덴이나 덴마크, 폴란드 등 유럽의 여러 나라에서 지역 난방을 도입하였으며[4], 국내에서도 1985년 처음으로 지역 난방이 도입된 이래 수도권 지역의 신규 택지 개발지역을 중심으로 지역 난방이 확대 보급되고 있다[5].

현재 지역 난방에 대한 연구는 국내외에서 많이 이루어지고 있다. Henning[1]은 energy system optimization model로 MODEST(Model for Optimization of Dynamic Energy Systems with Time Dependent Component and Boundary Condition)를 제안하였다. MODEST는 투자비용과 운전비용을 최소화 하기 위해서 Linear Programming을 사용하며, 시시각각으로 변하는 여러 가지 비용과 장치 용량을 고려할 수 있다. Henning[2]은 지역 난방을 공급할 때 축열조를 사용했을 경우를 고려하여 MODEST를 확장하였다. 유승직 외[6]는 과거 국내 지역 난방의 성과를 분석하고 관련 에너지 산업 및 신규 수요 분석 등을 통한 향후 지역 난방의 전망 및 사업 계획에 관한 연구를 하였으며 정일상[7]은 기존 열원 및 연계 배관 능력에 대한 종합적인 분석과 연계 증대 분석을 하였다. 위의 연구에서는 연계가 이루어질 때 운송되는 에너지의 양이 임의로 정해져 있지만 본 연구에서는 이를 계산을 통해 구할 수 있도록 하였다.

실제로 조업을 하다 보면 처음에 계획을 세웠을 때 생각하지 못했던 상황이 발생할 수 있다. 그 대표적인 예가 장치의 정지로 인해 수요를 맞추지 못하는 경우이다. 한국지역난방공사[5]에서는 이러한 비상의 경우를 계산이 아닌 임의의 상황을 설정하여 고려하였으나 본 연구에서는 이를 수학적인 방법으로 고려해 보았다.

Problem definition-basic model

그림 1[1]은 스웨덴에서 사용되는 energy system으로 여러 장치와 에너지 흐름으로 되어 있다. 지역에 열과 전기를 공급할 수 있도록 사용되는 장치로는 Combined Heat and Power (CHP) plant, Heat Only Boiler(HOB), Electric Boiler, Heat Pump 등이 있고, 이 장치를 운전하기 위해 사용되는 원료로 LPG, light fuel oil, heavy fuel oil, woodchip 등이 있다. 전기에 대해서는 직접 생산하지 않고 외부에서 사올 수 있다. 여기서 목적함수는 원료비용과 운

전비용을 최소화하는 것이 된다.

Henning[2] 에서 고려한 것처럼, 축열조가 있는 경우 열 수요에 대한 제약조건에 축열조의 charge (DNHS)와 discharge (HSDN) 의 양이 고려되어야 한다. 또한 축열조에서 diurnal period 사이에서의 storage content의 관계까지 고려된다. 이때는 열을 저장하는데 필요한 비용이 추가로 고려한다.

실제로는 (금요일→토요일)과 같이 평일 다음에는 주말이 오지만, (평일→주말)과 (주말→평일)의 회수가 적기 때문에 평일 다음에는 평일이 오고 주말 다음에는 주말이 오는 것으로 가정한다.

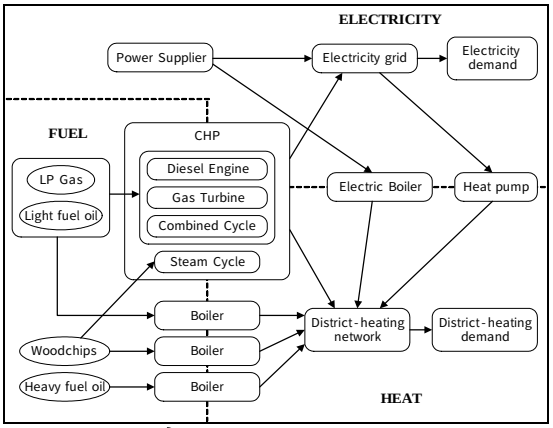

그림 1. Energy System[1]

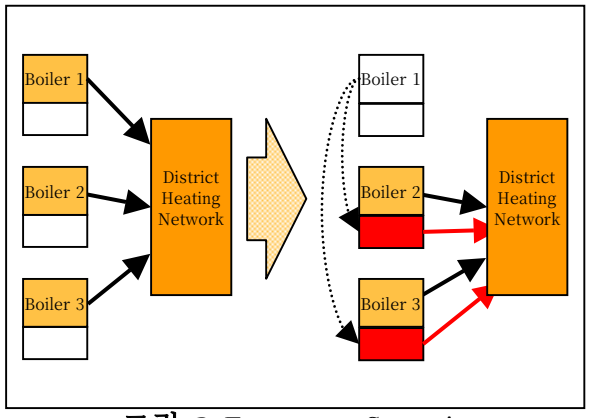

그림 2. Emergency Scenario

Consideration of Emergency Scenarios

조업을 하다 보면 고장이나 cleanup time 등의 이유로 장치가 멈추는 경우가 있다. 만일 이러한 상황을 고려하지 않은 채 생산계획을 수립한다면 열이나 전기를 수요에 맞게 공급할 수 없는 경우가 생기게 된다. 비상 상황을 대비하기 위해서 평상시 조업을 할 때, **그림 2**와 같이 장치를 100%로 조업을 하지 않고 여분을 둠으로써 하나의 장치가 고장이 나더라도 다른 장치의 여분을 이용해서 수요를 맞출 수 있게 된다.

이 문제를 풀 때 동시에 두 개 이상의 장치가 정지하는 경우는 없다고 가정하였다. 비상을 고려하기 위해서 장치의 용량을 결정하는 제약조건에 여분(vResB)가 고려 되어야 하며, 비상인 경우에 정지하지 않는 다른 장치들의 여분의 합이 정지하는 장치가 평상시에 생산하는 용량보다 커야 한다.

$$(used\ boiler\ size)_{b,i,j} + vResB_{b,b',i,j} \le (max.\ boiler\ size)_b \qquad \text{for all b, b′, i, j} \quad (1)$$

$$\sum_{\substack{b\in B \\ b\neq b'}} \left((eff.)_{b,e} \times vResB_{b,b',i,j}\right) \ge (eff.)_{b',e} \times (used\ boiler\ size)_{b',i,j} \qquad \text{for all b′, i, j} \quad (2)$$

Expand to Multi-Site

실제 문제에서는 **그림 3**과 같이 공급지와 수요지가 여러 곳이 존재하고 인접한 지역으로는 타 지역에서 운송해오는 경우를 생각할 수 있다. 이러한 연계를 고려할 때 일반적으로 운송은 운전비용이 적게 드는 쪽에서 많이 드는 쪽으로, 수요가 적은 쪽에서 많은 쪽으로, 장치의 용량이 많은 쪽에서 적은 쪽으로 이루어지게 된다.

이 경우 새로이 추가되는 변수 vTrIJTT는 site t에서 site t′으로 열 또는 전기가 운송되는 양을 나타낸다. 수요에 대한 제약조건에서 다른 지역에서 운송되어오는 에너지와 다른 지역으로 운송되어 나가는 에너지의 양이 고려되어야 한다. 또 목적함수에서 운송되

는 양에 따른 운송비가 고려 되어야 한다.

$$(total\ prod.)_{'Elec',i,j,t} + \sum_{\substack{t'\in T \\ t'\neq t}} vTrIJTT_{'Elec',i,j,t',t} \geq demandEIJ_{'Elec',i,j,t} + \sum_{\substack{t'\in T \\ t'\neq t}} vTrIJTT_{'Elec',i,j,t,t'} \quad \text{for all i, j, t} \qquad (3)$$

$$(total\ prod.)_{'Heat',i,j,t} + HSDN_{i,j,t} + \sum_{\substack{t'\in T \\ t'\neq t}} vTrIJTT_{'Heat',i,j,t',t} \geq (demand)_{'Heat',i,j,t} + DNHS_{i,j,t} + \sum_{\substack{t'\in T \\ t'\neq t}} vTrIJTT_{'Heat',i,j,t,t'} \quad \text{for all i, j, t} \qquad (4)$$

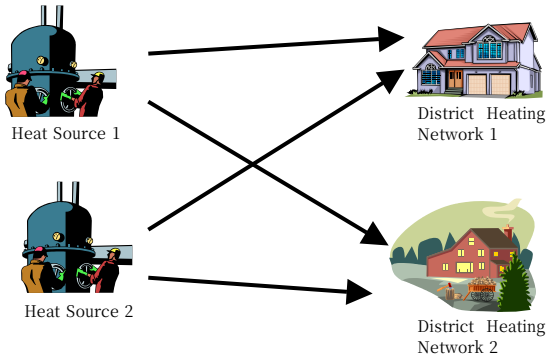

그림 3. Multi-Site

예제

예제 1은 **그림 1**에서 장치를 CHP Plant 18개와 Boiler 3개를 사용하여 에너지를 공급하고 열 수요만을 고려하였다. 축열조에 저장하거나 축열조에서 공급되는 열량은 70 Gcal/h로 제한하였을 때 비상을 고려하지 않고 주어진 모델을 통해 최적해를 구해보면 **그림 4**, 비상을 고려하여 같은 조건에서 문제를 풀어보면 **그림 5**와 같은 결과를 얻을 수 있다.

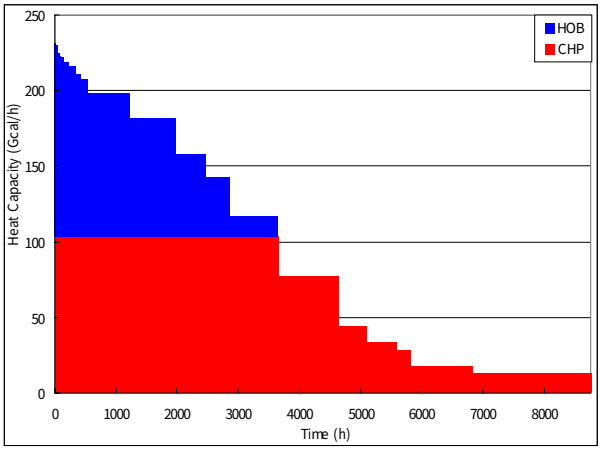

그림 4. 비상을 고려하지 않은 예제의 결과

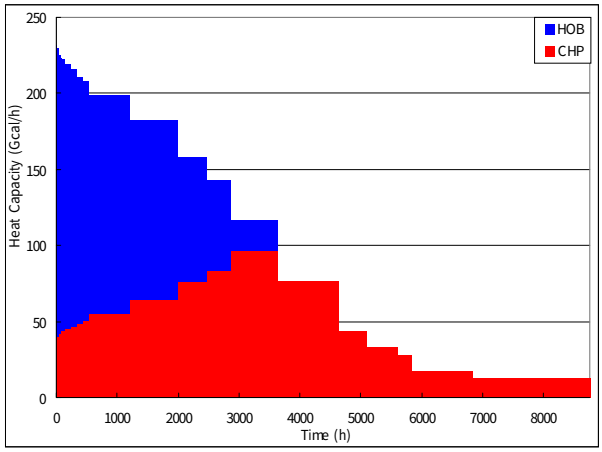

그림 5. 비상을 고려한 예제의 결과

비상을 고려했을 때의 목적함수 값은 434억 원으로, 고려하지 않았을 때의 목적함수 값 432억 원보다 많이 나왔다. 이것은 비상을 고려하지 않고 전체적으로 비용이 덜 드는 CHP Plant를 최대로 사용하지 않고 비상시를 대비해서 CHP Plant에서 열을 118483 Gcal 덜 생산하고 이 양을 Boiler를 사용해서 생산하기 때문이다.

예제 2는 그림 1에서 장치를 CHP Plant 5개와 Boiler 3개, Heat Pump 1개를 사용하는 Site 1과 CHP Plant 5개와 Boiler 4개, Heat Pump 1개를 사용하는 Site 2의 두 지역을 고려한 문제이다. 여기서 각 장치의 운전비용이 Site 2가 더 싸다고 가정하였다. 두 지역 사이에 에너지의 운송이 이루어지지 않았을 때의 목적함수 값은 2억 9579만원이었고, 에너지의 운송을 고려했을 때의 목적함수 값은 2억 9316만원이었다.

예제 2에서 운송을 고려한 상태에서 비상을 고려했을 경우 목적함수 값이 2억 9317만원이 나왔다. 예제 1에서와 마찬가지로 장치에서 비상시를 대비한 여분을 두기 때문에 전체적인 비용이 적게 드는 장치들의 사용이 줄어들고 비싼 장치를 더 사용했기 때문에 목적함수 값이 비상을 고려하지 않았을 경우보다 크게 나왔다. 그러나 비상시에 안정적으로 대처할 수 있기 때문에 공급 계획을 수립할 때 비상은 반드시 고려되어야 한다.

결론

본 연구에서는 수학적인 방법을 통해 장치에 여분을 두어 비상에 대비할 수 있는 공급 계획을 수립할 수 있게 하였다. 이 경우 기존의 임의로 여분을 정하는 방법에 비해 실제 문제에 좀더 효과적으로 접근할 수 있다. 또 여러 지역에 대한 문제를 풀어야 할 때 부족한 에너지를 공급하거나 전체적인 비용의 절감을 할 수 있도록 각 지역의 연계를 계산을 통해 고려하였다. 이 경우 역시 기존의 연구보다 어느 지역으로 얼마나 운송해 보내거나 운송 받아야 하는지에 대해서 정확하게 실제 모델에 적용할 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2002년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었습니다

참고문헌

1) D. Henning, *Energy*, **22(12)**, 1135-1150, 1997.
2) D. Henning, *Int. J. Energy Res.*, **22**, 691-713, 1998.
3) R. F. Babus'Haq and S. D. Probert, *Applied Energy*, **53**, 47-76, 1996.
4) J. Korhonen, *J. Clean. Prod.*, **10**, 537-544, 2002.
5) 한국지역난방공사, "수도권 지역난방 발전 기본계획 수립", 한국지역난방기술㈜, 2001.
6) 유승직, "집단에너지 공급기본계획 수립을 위한 연구", 에너지경제연구원, 2002.
7) 정일상, *지역난방기술*, **제8호**, 17-40, 2001.