

지역 냉난방 시스템의 에너지 분배 최적화

박태창 · 김의식 · 김래현* · 김원호** · 김진성*** · 여영구†

한양대학교 화학공학과
133-791 서울시 성동구 행당동
*서울산업대학교 화학공학과
139-743 서울시 노원구 공릉길 138
**인포트롤테크놀로지
158-735 서울시 양천구 목동 917-6
***동안엔지니어링(주)
138-847 서울시 송파구 석촌동 294-5
(2008년 12월 3일 접수, 2008년 12월 29일 채택)

Optimization of Energy Distribution in District Heating Systems

Tae Chang Park, Ui Sik Kim, Lae-Hyun Kim*, Weon Ho Kim**, Seong Jin Kim*** and Yeong Koo Yeo†

Department of Chemical Engineering, Hanyang University, 17 Haengdang-dong, Seongdang-gu, Seoul 133-791, Korea

*Department of Chemical Engineering, Seoul National University of Technology, 172 Gongreung 2-dong, Nowon-gu, Seoul 139-743, Korea

**Infotrol, Inc., 917-6 Mok-dong, Yangchun-gu, Seoul 158-735, Korea

***Dongan Eng, 294-5 Sukchondong, Songpa-gu, Seoul 138-847, Korea

(Received 3 December 2008; accepted 29 December 2008)

요 약

지역 냉난방 시스템은 각 지역에 열 수요를 충족시키는데 중요한 역할을 한다. 본 논문에서는 수도권 지역난방 연계 지사간의 효율적인 운전을 위한 경제적 운전 프로그램 개발의 필요성을 진단하고 이를 활용할 경우의 예상효과를 분석하였다. 분석대상 지역난방 지사로서는 수도권 지역난방 공급 네트워크로 연계되어 있는 지사들 가운데에서 수서 지역을 중심으로 주변의 분당, 일원, 중앙지역을 분석대상 지사들로 선정하여 각 지역의 열 생산량과 열 수요량을 측정하였다. 지역 냉난방 시스템의 운전비용이 최소가 되도록 하는 최적화 시스템의 구성에는 MILP 알고리즘이 이용되었다. 최적화 계산 결과를 토대로 지역간 연계 수열량과 공급비용을 예측하고 모델로부터 계산된 값을 통해 경제성을 분석하였다.

Abstract – A district energy system plays very important role to fulfill energy demand in regional areas. This paper diagnoses the necessity of the development of an economical operation system for the efficient operation of district energy plants located in Seoul. The effect anticipated from the use of the optimal operation system is also analyzed. Production and consumption of energy are estimated for the district energy plants at Suseo, Bundang, Ilwon and Jungang located near in Seoul, Korea. The problem is formulated as a mixed integer linear programming(MILP) problem where the objective is to minimize the overall cost of the district energy system. From the results of numerical simulations we can see that the energy efficiency is improved due to the application of the optimal operation conditions provided by the proposed model.

Key words: District Heating Systems, Energy Distribution, Optimization, District Network

1. 서 론

경제성장과 더불어 에너지 수요가 증가하고 있는 상황에서 부존 자원이 빈약한 우리나라에서는 에너지 이용 합리화 및 원천적인 에너지 절약사업으로서 지역난방사업이 추진되어 왔다. 지역난방열의

보급은 90년대 초의 분당, 평촌, 일산, 부천 등 수도권 신도시 지역으로의 적극적인 확대보급에 힘입어 2005년 6월말까지 지역 난방 분야의 10개 사업사(24개 지역)에 의하여 1,337천호의 공동주택 및 2,871개의 빌딩에 지역난방열이 공급되었다. 이는 우리나라 총 세대 수 기준 10.3% 이상의 보급률을 의미하는 것이다. 지역난방의 역사가 깊은 유럽에서는 지역 냉난방 시스템의 기존기술을 토대로 하여 새로운 시스템에 대한 연구개발이 병행되고 있다. 그러나 국내의 지역난방 운용은 그 역사가 비교적 짧으므로 아직 외국기술에 대한

†To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ykyeo@hanyang.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 최창균 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

의존도가 높고 운전 중 발생하는 유지보수 문제 등 여러 가지 제반 사항의 문제 등에 대한 대처능력이 떨어져 있다. 이에 따라 열 분배 시스템의 최적운전 기술의 개발에 대한 필요성은 더욱 커지고 있다.

열 분배 시스템의 최적화에 있어서는 크게 열 생산, 열 공급 네트워크 그리고 열 소비의 세 가지 주요부분 각각에 대한 최적화가 고려되어야 한다[1]. 특히 최적화 과정에서 중점을 두고 고려해야 하는 부분은 열 공급의 효율성과 공급비용의 최소화이다. 즉 소비자의 열 요구량을 충족시키면서 열 생산은 최소로 하여 비용을 최소로 하는 것이 열 분배 시스템 최적화의 핵심이다. 소비자의 열 요구량을 충족시키기 위해 우선 시행되어야 하는 것은 소비자의 열 수요량을 정확하게 측정하는 것이다. 열 수요량 측정에는 소비자의 사회적 활동과 함께 기상 상황을 아울러 고려해야 하며[2], 최적의 열 공급이 이루어지기 위해서는, 즉 필요한 최소 열을 공급하기 위해서는 소비자에게 공급된 열과 소비자가 소비한 열 사이의 차이를 정확하게 측정해야 한다[3]. 또한 파이프라인을 통하여 열을 분배하는 과정에서 열 손실을 정확하게 규명해야만 열 공급 온도의 오차를 줄일 수 있다[4]. 온도 측정이 이루어진 후에 열 요구량을 만족시키기 위한 열 생산, 생산 공장에서의 열 분배, 파이프라인을 통한 열 분배 그리고 열 저장 등을 모두 고려한 생산과 분배의 최적화가 이루어질 수 있다. 이러한 과정에서 발생한 총 비용을 최소로 하는 것이 최적화의 목표로서 MILP 알고리즘을 이용하여 이 문제를 해결할 수 있다[5]. 정수변수를 포함하는 MILP 문제에 있어서 적은 수의 정수를 포함하며 짧은 운전 기간에 대한 문제는 branch-and-bound 방법으로, 많은 수의 정수를 포함하며 비교적 장기간에 걸친 운전기간에 대한 문제는 generic algorithm approach 방법으로 처리할 수 있다[6]. 또한 분배 에너지 시스템을 위한 네트워크의 합성과 최적화를 위하여 graph theory 방법도 적용할 수 있다[7].

본 연구에서는 수도권 지역난방 열 공급 네트워크로 연계되어 있는 지사들 가운데 수서지역을 대상지역으로 선정하여 열 생산 및 열 수요를 측정하고 그 데이터를 기초로 MILP 알고리즘을 이용하여 수서지역과 연계된 다른 지역들 간의 최적 연계 수열량과 관련비용을 계산하였다. 이로부터 얻은 결과를 토대로 하여 지역간 열 수급의 경제성을 평가하였다.

2. 지역난방 시스템의 최적화 모델

2-1. 지역난방 시스템

지역난방 시스템에서의 에너지 관리 및 최적화의 목표는 열 요구량을 만족시키기 위한 모든 열 공급 비용을 최소화하는 것이므로 먼저 각 지역의 열 생산량과 열 수요량을 측정하고, 이를 통해 공급 가능한 연계 열량이 계산되어야 한다. 이에 따라 수요 예측 시스템과 에너지 판매 시스템 체계화의 필요성이 제시된다. 본 연구에서는 열 병합발전 내에서 생산되는 에너지의 최적화 문제에 대한 고려는 제외하였으며 각 지역의 수요, 즉 열 요구량을 예측하고 그 요구량을 만족시키는 최소 공급량과 운전비용의 최적화를 고려하여 보았다.

수도권 지역난방 에너지 공급 네트워크로 연계되어 있는 지사가운데 Fig. 1에 보인 바와 같이 수서지역을 중심으로 한 주변지역인 분당, 일원 그리고 중앙지역을 분석대상 지역난방 지사로 선정하였다.

공급비용을 최소화하는 문제를 고려하기 위해서는 먼저 수열 및 공급되는 열의 단가를 알아야 한다. 이에 대한 자료는 Table 1에 보인 바와 같다. 열 단가는 2007년 3월 22일과 2007년 4월 1일에 조

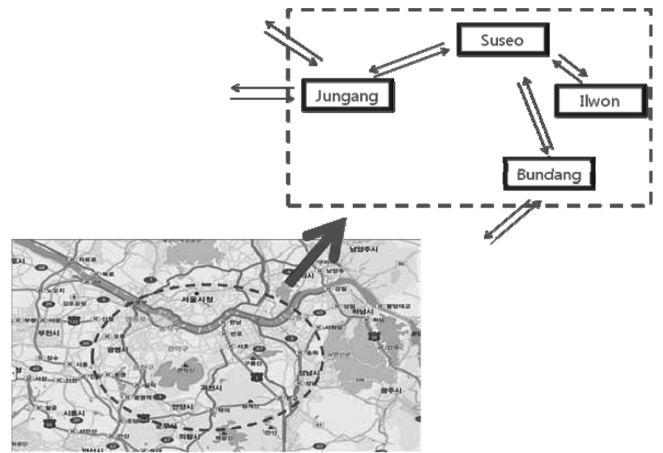


Fig. 1. Diagram of heat supply network near Suseo.

Table 1. Heat supply cost per hour(won/Gcal)

Date	Bundang to Suseo	Ilwon to Suseo	Jungang to Suseo
2007.3.22	31,973	36,000	34,613
2007.4.01	30,395	36,000	28,289

사된 자료를 참고하였다. 2007년 3월 22일의 자료를 보면 분당에서 수서지역으로의 열 공급 단가는 31,973원/Gcal이고, 중앙에서 수서지역으로의 열 공급 단가는 34,613원/Gcal으로서 중앙에서 수서지역으로의 열 공급 단가가 더 비싸다. 2007년 4월 1일의 경우 분당에서 수서지역으로의 열 공급 단가는 30,395원/Gcal이고, 중앙에서 수서지역으로의 열 공급 단가는 28,289원/Gcal으로서 분당에서 수서지역으로의 열 공급 단가가 더 비싸다. 또한 두 경우 모두에서 일원에서 수서지역으로의 열 공급 단가에 대해서는 알려진 바가 없지만 실제로 일원에서 수서지역으로 공급이 가능한 열은 거의 없으므로 여기서는 열 단가를 세 가지의 공급비용 가운데 가장 비싼 36,000원/Gcal으로 가정하여 일원에서 수서지역으로의 열 공급량이 최소가 되도록 하였다.

2-2. 최적화 문제의 구성

2-2-1. 목적함수와 제약조건

목적함수와 제약조건은 두 가지의 경우로 나누어서 고려하였다. 첫 번째 경우(Case 1)에서는 수서지역의 열 수요량이 열 생산량보다 많아서 열을 공급받아야 되는 경우 수서지역의 열 요구량을 만족시키면서 공급비용의 합을 최소로 하는 함수를 목적함수로 결정하였다. 두 번째 경우(Case 2)에서는 수서지역의 열 생산량이 수요량보다 많아서 분당, 일원, 중앙의 세 지역에 공급할 수 있는 열이 있는 경우 세 지역의 열 요구량을 만족시키면서 공급비용의 합을 최소로 하는 함수를 목적함수로 결정하였다.

Case 1: (수서지역의 열 수요량) > (수서지역의 열 생산량)

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급되는 열이 수서지역의 열 요구량을 만족시키면서 열 공급비용이 최소가 되도록 식 (1)과 같이 목적함수를 정하였다.

$$\min QBS \times cb + QIS \times ci + QJS \times cj + QSB \times cs1 + QSI \times cs2 + QSJ \times cs3 \quad (1)$$

QBS, QIS, QJS는 각각 분당에서 수서지역, 일원에서 수서지역,

중앙에서 수서지역으로 공급되는 열량을 의미하며 QSB, QSI, QSJ는 수서에서 분당지역, 수서에서 일원지역, 수서에서 중앙지역으로 공급되는 열량을 의미한다. cb, ci, cj는 각각 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 보내지는 열의 비용, 즉 수서지역을 기준으로 한 연계수열 비용을 의미하며 cs1, cs2, cs3는 수서에서 각각 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 보내지는 열의 비용, 즉 분당, 일원, 중앙지역을 기준으로 한 연계수열 비용을 의미한다.

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급 가능한 열량의 합이 수서지역의 열 요구량보다 큰 값을 가지는 경우 제약조건은 식 (2)에 나타난 것과 같다.

$$DS-PS \leq QBS+QIS+QJS \quad (2)$$

위에서 DS는 수서지역의 열 수요량을 의미하고 PS는 수서지역의 열 생산량을 의미한다. 각 지역의 공급 가능한 열량은 각 지역의 열 생산량에서 열 수요량을 뺀 값보다는 작아야 하는데 이는 식 (3)-(5)에 보인 바와 같이 나타낼 수 있다:

$$QBS \leq PB-DB \quad (3)$$

$$QIS \leq PI-DI \quad (4)$$

$$QJS \leq PJ-DJ \quad (5)$$

위에서 PB, PI, PJ는 각각 분당, 일원, 중앙지역 내에서의 열 생산량을 의미하고 DB, DI, DJ는 각각 분당, 일원, 중앙지역 내에서의 열 수요량을 의미한다. 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급 가능한 열량의 합이 수서지역의 열 요구량보다 작은 값을 가지는 경우 식 (2)의 제약조건은 식 (6)에 보인 바와 같이 달라진다.

$$PB-DB+PI-DI+PJ-DJ \geq QBS+QIS+QJS \quad (6)$$

Case 2: (수서지역의 열 수요량) < (수서지역의 열 생산량)

목적함수는 앞의 식 (1)과 동일하다. 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급 가능한 열량의 합이 세 지역의 열 요구량보다 큰 값을 가지는 경우 제약조건은 식 (7)에 나타난 것과 같다.

$$DB-PB+DI-PI+DJ-PJ \leq QSB+QSI+QSJ \quad (7)$$

공급 가능한 열량은 각 지역의 열 수요량에서 열 생산량을 뺀 값보다는 작아야 하며 이는 식 (8)-(10)에 보인 바와 같다:

$$QSB \leq DB-PB \quad (8)$$

$$QSI \leq DI-PI \quad (9)$$

$$QSI \leq DJ-PJ \quad (10)$$

수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급 가능한 열량의 합이 세 지역의 열 요구량보다 작은 값을 가지는 경우 식 (7)의 제약조건은 식 (11)과 같이 달라진다.

$$PS-DS \leq QSB+QSI+QSI \quad (11)$$

위에서 정한 목적함수와 제약조건을 해당되는 상태 방정식들로 나타내어 보기로 한다.

Case 1: (수서지역의 열 수요량) > (수서지역의 열 생산량)

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급 가능한 열량의 합이 수서지역의 열 요구량보다 큰 값을 가지는 경우 목적함수와 제약조건을 나타내는 식들은 식 (12)와 식 (13)에 보인 바와 같다.

목적함수:

$$\min[cb \quad ci \quad cs1 \quad cs2 \quad cs3] \begin{bmatrix} QBS \\ QIS \\ QJS \\ QSB \\ QSI \\ QSJ \end{bmatrix}$$

제약조건:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} QBS \\ QIS \\ QJS \\ QSB \\ QSI \\ QSJ \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} PB-DB \\ PI-DI \\ PJ-DJ \\ -(DS-PS) \end{bmatrix} \quad (13)$$

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급 가능한 열량의 합이 수서지역의 열 요구량보다 작은 값을 가지는 경우 목적함수는 식 (12)와 동일하고 제약조건을 나타내는 상태방정식은 식 (14)에 보인 바와 같다.

제약조건:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} QBS \\ QIS \\ QJS \\ QSB \\ QSI \\ QSJ \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} PB-DB \\ PI-DI \\ PJ-DJ \\ -(PB-DB+PI-DI+PJ-DJ) \end{bmatrix} \quad (14)$$

Case 2: (수서지역의 열 수요량) < (수서지역의 열 생산량)

수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급 가능한 열량의 합이 세 지역의 열 요구량보다 큰 값을 가지는 경우 목적함수는 식 (12)와 동일하고 제약조건을 나타내는 상태방정식은 식 (15)에 나타난 것과 같다.

제약조건:

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} QBS \\ QIS \\ QJS \\ QSB \\ QSI \\ QSJ \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} DB-PB \\ DI-PI \\ DJ-PJ \\ -(DB-PB+DI-PI+DJ-PJ) \end{bmatrix} \quad (15)$$

수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급 가능한 열량의 합이 세 지역의 열 요구량보다 작은 값을 가지는 경우 목적함수는 식 (12)와 동일하고 제약조건을 나타내는 상태방정식은 식 (16)에 나타난 것과 같다.

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} QBS \\ QIS \\ QJS \\ QSB \\ QSI \\ QSJ \end{bmatrix} \leq \begin{bmatrix} DB-PB \\ DI-PI \\ DJ-PJ \\ -(PS-DS) \end{bmatrix} \quad (16)$$

2-2-2. 지역간 열 공급

세 지역 상호간의 열 공급 방법에 따라 세 가지 경우를 고려하였

Table 2. Heat product and demand of regions in Case 1(Gcal)

Time (h)	S* region		B region		I region		J region	
	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand
1	260	348	300	234	40	19	200	186
2	260	327	300	249	40	18	200	182
3	260	326	300	260	40	17	200	180
4	260	326	300	262	40	19	200	182
5	260	353	300	245	40	20	200	179
6	260	355	300	240	40	19	200	177
7	260	356	300	235	40	17	200	171
8	260	356	300	234	40	20	200	172
9	260	359	300	248	40	18	200	168
10	260	340	300	252	40	18	200	165
11	260	304	300	261	40	17	200	139
12	260	280	300	262	40	17	200	156
13	260	285	300	257	40	19	200	195
14	260	285	300	248	40	17	200	166
15	260	276	300	247	40	17	200	175
16	260	265	300	251	40	18	200	178
17	260	274	300	253	40	17	200	172
18	260	273	300	244	40	17	200	171
19	260	289	300	228	40	19	200	177
20	260	315	300	226	40	18	200	179
21	260	314	300	238	40	18	200	182
22	260	324	300	243	40	19	200	180
23	260	324	300	236	40	19	200	182
24	260	318	300	235	40	19	200	186

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

다. 즉 2005년 3월 22일에 조사된 각 지역의 열 수요량과 연계수열 비용을 바탕으로 하여 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(Case 1), 2007년 4월 1일에 조사된 연계수열 비용 데이터를 토대로 하여 위의 Case 1과 같은 경우(Case 2), 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 열 공급이 가능한 경우(Case 3)의 세 가지로 구분하여 각 지역의 열 생산량과 열 수요량을 조사하였다.

Case 1: 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(2007년 3월 22일 연계수열 비용 적용)

2005년 3월 22일에 조사된 열 수요량을 기준으로 분당, 일원, 중앙지역의 열 생산량과 열 수요량을 0시부터 24시까지 1시간간격으로 나누어서 Table 2에 나타내었다. 이 표에 나타낸 생산량은 최대 생산량으로 가정하여 각각 수서 260 Gcal, 분당 300 Gcal, 일원 40 Gcal 그리고 중앙 200 Gcal으로 나타내었다. Table 2로부터 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 열 생산량이 열 수요량보다 많으므로 수서지역으로 공급이 가능한 열이 세 지역에 존재하는 것을 알 수 있다.

Case 2: 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(2007년 4월 1일 연계수열 비용 적용)

위의 Table 2에서 중앙지역의 열 생산량만을 200 Gcal에서 250 Gcal로 바꾸어 Table 3에 나타내었다. 또한 Case 2에서는 2007년 4월 1일에 조사된 연계수열 비용을 적용하였다.

Case 3: 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 열 공급이 가능한 경우

2005년 3월 22일에 조사된 열 수요량을 기준으로 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 열이 공급되도록 지역의 최대 생산량을 각각 수서 400 Gcal, 분당 200 Gcal, 일원 10 Gcal, 그리고 중앙 100 Gcal로 가정하여 Table 4에 나타내었다. Table 4로부터 수서지역의 열 생산량이 열 수요량보다 많으므로 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급이 가능한 열이 존재하는 것을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

앞에서 설정된 세 가지 경우에서 각각의 열 생산량과 열 수요량을 바탕으로 지역간 연계 수열량과 최소의 공급비용을 최적화 모델로부터 계산된 비용과 비교 검토하여 경제성을 분석하였다.

Case 1: 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(2007년 3월 22일 연계수열 비용 적용)

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급되는 최적 연계 수열량을 Table 5에 나타내었다. 연계수열 비용 측면에서 보았을 때 분당에서 수서지역으로의 연계수열 비용(31,973원/Gcal)이 가장 저렴하기 때문에 우선 공급되고, 다음으로 중앙에서 수서지역(34,613원/Gcal)으로 열이 공급된다. 그 이후에도 수서지역내의 열 요구량을 충족시키지 못했을 경우 일원에서 수서지역(36,000원/Gcal)으로 열이 공급된다. 각 시간 별 최적화된 연계수열 비용을 수서지역의

Table 3. Heat product and demand of regions in Case 2(Gcal)

Time (h)	S* region		B region		I region		J region	
	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand
1	260	348	300	234	40	19	250	186
2	260	327	300	249	40	18	250	182
3	260	326	300	260	40	17	250	180
4	260	326	300	262	40	19	250	182
5	260	353	300	245	40	20	250	179
6	260	355	300	240	40	19	250	177
7	260	356	300	235	40	17	250	171
8	260	356	300	234	40	20	250	172
9	260	359	300	248	40	18	250	168
10	260	340	300	252	40	18	250	165
11	260	304	300	261	40	17	250	139
12	260	280	300	262	40	17	250	156
13	260	285	300	257	40	19	250	195
14	260	285	300	248	40	17	250	166
15	260	276	300	247	40	17	250	175
16	260	265	300	251	40	18	250	178
17	260	274	300	253	40	17	250	172
18	260	273	300	244	40	17	250	171
19	260	289	300	228	40	19	250	177
20	260	315	300	226	40	18	250	179
21	260	314	300	238	40	18	250	182
22	260	324	300	243	40	19	250	180
23	260	324	300	236	40	19	250	182
24	260	318	300	235	40	19	250	186

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

Table 4. Heat product and demand of regions in Case 3(Gcal)

Time (h)	S* region		B region		I region		J region	
	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand	Product	Demand
1	400	348	200	234	10	19	100	186
2	400	327	200	249	10	18	100	182
3	400	326	200	260	10	17	100	180
4	400	326	200	262	10	19	100	182
5	400	353	200	245	10	20	100	179
6	400	355	200	240	10	19	100	177
7	400	356	200	235	10	17	100	171
8	400	356	200	234	10	20	100	172
9	400	359	200	248	10	18	100	168
10	400	340	200	252	10	18	100	165
11	400	304	200	261	10	17	100	139
12	400	280	200	262	10	17	100	156
13	400	285	200	257	10	19	100	195
14	400	285	200	248	10	17	100	166
15	400	276	200	247	10	17	100	175
16	400	265	200	251	10	18	100	178
17	400	274	200	253	10	17	100	172
18	400	273	200	244	10	17	100	171
19	400	289	200	228	10	19	100	177
20	400	315	200	226	10	18	100	179
21	400	314	200	238	10	18	100	182
22	400	324	200	243	10	19	100	180
23	400	324	200	236	10	19	100	182
24	400	318	200	235	10	19	100	186

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

Table 5. Optimum heat supply in Case 1(Gcal)

Time (h)	Optimum heat supply		
	B*→S	I→S	J→S
1	66	8	14
2	50.9996	0	16.0004
3	39.9998	6.0009	19.9994
4	38	10	18
5	55	17	21
6	59.9998	12.001	22.9993
7	64.9994	2.0012	28.9994
8	65.9997	2.0005	27.9998
9	51.9997	15.0012	31.9991
10	47.9991	0.0001	32.0009
11	38.9883	0.0036	5.0082
12	20	0	0
13	25	0	0
14	25	0	0
15	16	0	0
16	5	0	0
17	14	0	0
18	12.9979	0.0004	0.0019
19	28.9978	0.0015	0.0008
20	55	0	0
21	53.9994	0.0001	0.0005
22	57	0	7
23	63.9852	0.006	0.0095
24	58	0	0

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

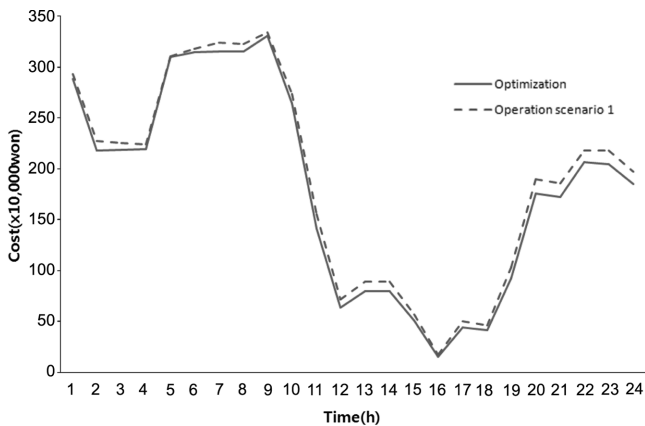


Fig. 2. Heat supply cost of optimization and operation scenario 1 in Case 1.

열 요구량을 만족시키는 최적화되지 않은 비용(Operation scenario 1)과 함께 Fig. 2에 나타내었다. 최적화된 비용은 실제 비용과 비교하여 약 5.6% 더 낮은 것을 확인할 수 있다.

Case 2: 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(2007년 4월 1일 연계수열 비용 적용)

분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 공급되는 최적 연계 수열량을 Table 6에 나타내었다. 연계수열비용 측면에서 보았을 때 중앙에서 수서지역으로의 연계수열 비용(28,289 원/Gcal)이 분당에서 수서지역으로의 연계수열 비용(30,395 원/Gcal)보다 저렴하기 때문에 중앙지역의 열이 먼저 공급되고 아울러 중앙지역의 열이 수

Table 6. Optimum heat supply in Case 2(Gcal)

Time (h)	Optimum heat supply		
	B*→S	I→S	J→S
1	24	0	64
2	0.0001	0	66.9999
3	0.0379	0.0004	65.9618
4	0.0003	0.0001	65.9996
5	22.0228	0.0004	70.9769
6	22.03	0.0004	72.9697
7	17	0	79
8	18.003	0.0001	77.9969
9	17	0	82
10	0.0001	0	79.9999
11	0	0	44
12	0	0	20
13	0	0	25
14	0	0	25
15	0.0015	0	15.9986
16	0	0	5
17	0.0006	0	13.9995
18	0.0001	0	13
19	0	0	29
20	0	0	55
21	0.0001	0	53.9999
22	0	0	64
23	0	0	64
24	0.007	0.0001	57.9929

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

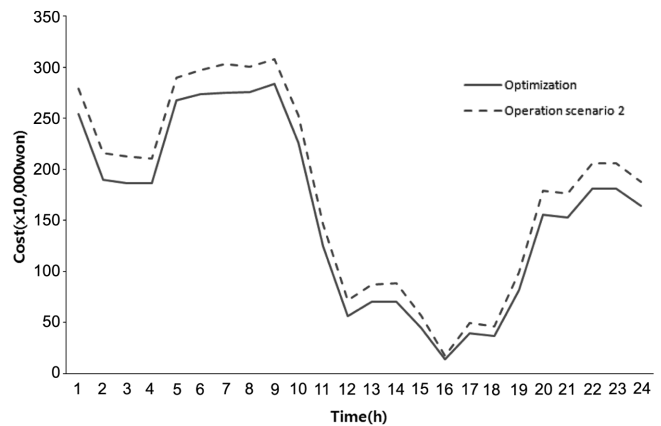


Fig. 3. Heat supply cost of optimization and operation scenario 2 in Case 2.

서지역의 열 요구량을 모두 충족시키지 못했을 경우에 나머지 열을 분당지역의 열이 충족시킨다. 그 이후에도 수서지역내의 열 요구량을 충족시키지 못했을 경우 일원에서 수서지역(36,000 원/Gcal)으로 열이 공급된다. 각 시간 별 최적화된 연계수열 비용을 수서지역의 열 요구량을 만족시키는 최적화되지 않은 비용(Operation scenario 2)과 같이 Fig. 3에 나타내었다. 최적화된 비용은 실제 비용과 비교하여 볼 때 약 11.8% 정도 낮은 것을 확인할 수 있다.

Case 3: 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 열 공급이 가능한 경우

수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 공급되는 최적 연

Table 7. Optimum heat supply in Case 3(Gcal)

Time (h)	Optimum heat supply		
	S*→S	S→I	S→J
1	0	0	52
2	0.0034	0.0001	72.9966
3	0.0001	0	73.9999
4	0.0001	0.0011	73.9995
5	0	0	47
6	0	0	45
7	0	0	44
8	0	0	44
9	0.0001	0.0009	40.9997
10	0	0	60
11	57.002	0.0001	38.9979
12	61.992	2.0232	55.9854
13	20	0	95
14	48	1	66
15	47	2	75
16	51	6	78
17	53	1	72
18	44.0003	6.9999	71.0001
19	27.9999	6.0001	77
20	5.9999	0.0016	78.9986
21	4.002	0.0013	81.9968
22	0.0001	0.0011	76.0001
23	0	0.0007	75.9998
24	0.003	0	81.9972

*B: Bundang, S: Suseo, I: Ilwon, J: Jungang

계 수열량을 Table 7에 나타내었다. 수서지역에서 공급되는 연계수열 비용은 조사된 것이 없으므로 Table 1의 2007년 4월 1일 비용을 기준으로 하여 수서에서 분당지역은 30,395 원/Gcal, 수서에서 일원지역은 36,000 원/Gcal, 수서에서 중앙지역은 28,289 원/Gcal로 가정하였다. 연계수열 비용 측면에서 보았을 때 수서에서 중앙지역으로의 연계수열비용(28,289 원/Gcal)이 수서에서 분당지역으로의 연계수열 비용(30,395 원/Gcal)보다 저렴하기 때문에 수서에서 중앙지역으로 열이 먼저 공급되고 다음으로 수서에서 분당지역으로 열이 공급된다. 그 이후에 수서에서 일원지역(36,000 원/Gcal)으로 열이 공급된다. 각 시간 별 최적화된 연계수열 비용을 분당, 일원, 중앙의 세 지역의 열 요구량을 만족시키는 최적화되지 않은 비용

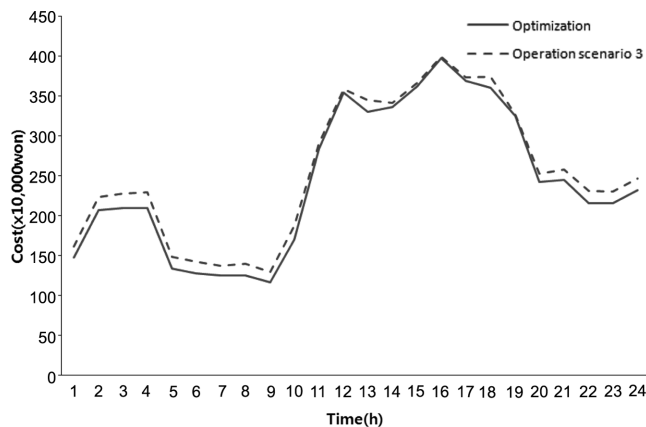


Fig. 4. Heat supply cost of optimization and operation scenario 3 in Case 3.

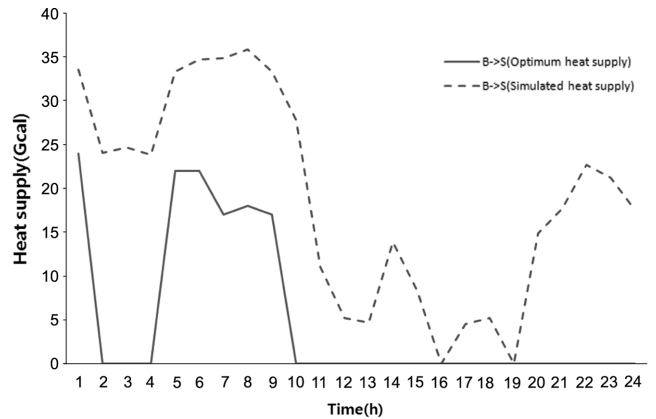


Fig. 5. Optimum and simulated heat supply from Bundang to Suseo in Case 2(B: Bundang, S: Suseo).

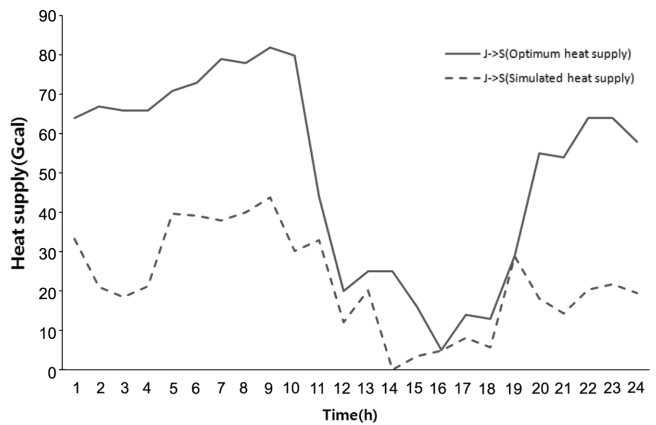


Fig. 6. Optimum and simulated heat supply from Jungang to Suseo in Case 2(J: Jungang, S: Suseo).

(Operation scenario 3)과 같이 Fig. 4에 나타내었다. 최적화된 비용은 실제 비용보다 약 4.6% 정도 낮음을 확인할 수 있다.

아울러 Table 1에서 나타낸 각 지역의 연계수열 비용을 무시하고, 각각의 연계수열 비용의 차이가 매우 작다고 가정하여 계산을 수행하여 보았다. 즉 분당에서 수서지역, 일원에서 수서지역, 중앙에서 수서지역으로 공급되는 각 열의 단가 차를 매우 작은 값으로 가정하여 Case 2에 대한 최적화 계산을 수행하였다. 최적화 결과값과 설정 비용을 비교한 결과를 Fig. 5와 6에 나타내었다. Fig. 5는 분당에서 수서지역으로 공급되는 열에 대하여 최적화로부터 얻은 값과 수치모사로부터 얻은 값을 보인 것이다. Fig. 6은 중앙에서 수서지역으로 공급되는 열에 대하여 최적화로부터 얻은 값과 수치모사로부터 얻은 값을 나타낸 것이다. 이 결과들로부터 최적화된 값과 모사 결과 값들이 차이를 보임을 알 수 있다. 이는 연계수열 비용의 차가 매우 작은 값을 갖게 되면 이를 통해 최적화된 연계수열의 총 비용 역시 큰 차이가 없기 때문에 연계수열량의 차이가 발생하기 때문인 것으로 보인다.

4. 결 론

수도권 지역난방 공급 네트워크로 연계되어 있는 지사들 가운데 수서지역을 중심으로 한 주변지역인 분당, 일원, 중앙지역을 분석대상 지역난방 지사로 선정하고, 각 지사의 열 생산량과 열 수요량을

통하여 각 지역의 열 요구량을 만족시키기 위해 공급되는 지역 열 공급에 대한 최적화를 수행하였다. 목적함수는 세 지역에서 공급되는 비용이 최소가 되도록 설정하였으며 최적화 계산에서는 MILP 방법을 이용하였다. 우선 공급되는 상황에 따라 분당, 일원, 중앙의 세 지역에서 수서지역으로 열 공급이 가능한 경우(Case 1, Case 2)와 수서지역에서 분당, 일원, 중앙의 세 지역으로 열 공급이 가능한 경우(Case 3)로 나누었고, 최적화된 비용과 실제 비용을 비교하여 보았다. Case 1의 경우 약 5.6%, Case 2의 경우 약 11.8% 그리고 Case 3의 경우 약 4.6%의 비용절감 효과를 확인하였다. 위의 결과를 통하여 대상지역의 정확한 요구량이 측정된다면 그 지역의 요구량을 만족시키는 최적비용의 연계 수열량과 비용을 계산할 수 있음을 확인하였다.

사용기호

B	: region of Bundang [-]
I	: region of Ilwon [-]
J	: region of Jungang [-]
S	: region of Suseo [-]
PB	: heat product in Bundang [Gcal]
PI	: heat product in Ilwon [Gcal]
PJ	: heat product in Jungang [Gcal]
PS	: heat product in Suseo [Gcal]
DB	: heat demand in Bundang [Gcal]
DI	: heat demand in Ilwon [Gcal]
DJ	: heat demand in Jungang [Gcal]
DS	: heat demand in Suseo [Gcal]
QBS	: heat supply from Bundang to Suseo [Gcal]
QIS	: heat supply from Ilwon to Suseo [Gcal]
QJS	: heat supply from Jungang to Suseo [Gcal]
QSB	: heat supply from Suseo to Bundang [Gcal]

QSI	: heat supply from Suseo to Ilwon [Gcal]
QSJ	: heat supply from Suseo to Jungang [Gcal]
cb	: heat supply cost from Bundang to Suseo [Won/Gcal]
ci	: heat supply cost from Ilwon to Suseo [Won/Gcal]
cj	: heat supply cost from Jungang to Suseo [Won/Gcal]
cs1	: heat supply cost from Suseo to Bundang [Won/Gcal]
cs2	: heat supply cost from Suseo to Ilwon [Won/Gcal]
cs3	: heat supply cost from Suseo to Jungang [Won/Gcal]

참고문헌

1. Sandou, G., Font, S., Tebbani, S., Hiret, A. and Mondon, C., "Predictive control of a complex district heating network," *Decision and Control*, **44**, 7372-7377(2005).
2. Erik, D., "Simple Model for Prediction of Loads in District-heating Systems," *Applied Energy*, **73**, 277-284(2002).
3. Jovic, F., Rajkovic, V., Jagnjic, Z. and Vuksanovic, D., "Predictive Model of the Distributed Heating," *Information Technology Interfaces*, **1**, 325-329(2001).
4. Çomaklı, K., Yüksel, B. and Çomaklı, Ö., "Evaluation of Energy and Exergy Losses in District Heating Network," *Applied Thermal Engineering*, **24**, 1009-1017(2004).
5. Söderman, J. and Pettersson, F., "Structural and Operational Optimisation of Distributed Energy Systems," *Applied Thermal Engineering*, **26**, 1400-1408(2005).
6. Söderman, J., "Optimisation of Structure And Operation of District Cooling Networks in Urban Regions," *Applied Thermal Engineering*, **27**, 2665-2676(2007).
7. Weber, C., Heckl, I., Friedler, F., Marechal, F. and Favrat, D., "Network Synthesis for a District Energy System: A Step Towards Sustainability," *16th European Symposium on Computer Aided Process Engineering and 9th International Symposium on Process Systems Engineering*, 1869-1874(2006).