

부하에 따른 도시기반 공급·처리시스템의 최적설계에 관한 연구

이 태 원* · 김 용 기*

A Study on the Optimal Design of Urban Utility Systems

Tae-Won Lee and Yong-Ki Kim

Key Words: Urban utility systems(도시기반 공급·처리설비), Optimal design and operation(최적설계 및 운영), Numerical analysis(수치해석), Economic performance(경제성분석)

Abstract

The mathematical method was developed and numerical analyses were carried out with various parameters to provide substantial data for optimal design and operation of urban utility systems. The composition of systems and their specifications, such as co-generation system, heat pump system, incineration system and other heating and cooling system could be obtained through these analyses for various resource and energy requirements in urban area.

As results the system constituents and operating characteristics, and their economic performances such as the value of objective function, initial and an operating costs were discussed for various load patterns. The effective system design method and the excepted effects of the several unused energy recovery systems were also briefly discussed with the variation of the buildings and facilities species and their capacities.

기호설명

- x : 각 기기의 에너지소비량, (m^3/h or kW)
- y : 각 기기의 용량, (kW)
- z : 초기설비비, (천원)
- a, b : 각 기기의 성능특성방정식 매개변수
- c : 연료의 단가, ($원/m^3$ or $원/kWh$)

하첨자

- m : 월 (month)
- h : 시간 또는 절점
- i : 시스템의 구성요소 기기

1. 서론

최근 도시계획 및 단지계획 수행시 수요처로부터 멀리 떨어진 원격지에 대규모의 공급 및 처리 플랜트를 건설하는 것이 통념이 되어 왔다. 그러나 이로 말미암아 자원이나 폐기물 및 에너지의 장거리 수송에 따른 각종 손실이 증가함은 물론, 지역적, 계절적, 시간적인 각종 부하의 변동에 따른 시스템의 능동적이고 탄력적인 운용이 불가능하고, 시설의 대규모화에 따라 재생가능 자원 및 에너지의 이용이 거의 불가능하여 결과적으로 시스템 효율의 저하와 아울러 자원 및 에너지의 비효율적 이용을 초래하게 되었다. 또한 주로 개별 시스템으로 구성되는 현재의 시설로는 효율적이고 환경친화적인 운전을 기대하기 어렵고 경제성의 측면에서도 매우 불리하므로, 결국 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 적절한 장소에 적절한 종류 및 용량의 장치가 설치되어야

*정회원, 한국건설기술연구원
E-mail : twlee@kict.re.kr, ykkim@kict.re.kr
Tel : +82-344-910-0384; Fax : +82-344-910-0381

하며 특히 자원과 에너지의 공급시설 및 처리시설이 상호 연계되는 복합플랜트의 구축이 절실히 요구되고 있다.

본 연구에서는 도시지역에서의 자원 및 에너지 공급·처리시설의 최적설계 및 운영에 필요한 자료를 제공하기 위해 각종의 자원·에너지 부하에 따라 최적의 시스템의 구성 즉 기기의 종류, 용량 및 운전패턴 등을 결정할 수 있게 해주는 시스템 수치해석 방법을 개발하고 각종 변수의 변화에 따른 시뮬레이션을 수행하였다. 해석결과로서 부하량 및 부하패턴의 변화에 따른 초기투자비 및 운전비 등 경제성과 기기구성의 특성 및 운전형태를 고찰하였고, 미활용에너지의 도입방안 및 효과에 대해서도 분석하였다. 또한 각종 자원 및 에너지의 원단위를 이용하여 도시지역에서의 건물과 시설의 용도별 면적 또는 시설용량의 변화에 따른 효과적인 시스템 구성방법에 대해서도 간단히 논하였다.

2. 해석모델 및 방법

2.1 해석모델

도시지역에서 일반적으로 설치되는 기반시설 중 먼저 자원의 처리·회수·이용시설로서 도시 생활하수를 처리하는 하·중수처리시설, 가연성 도시쓰레기를 소각 처리하는 쓰레기 소각시설이 검토될 수 있다. 이때 하·중수처리시설에서는 처리공정에 따라 소화가스 및 슬러지가 배출되는데 이를 연료 등으로 재자원화하는 방안이 강구되고 있고, 또 하수에 잠재되어 있는 열원을 이용하고자 하는 시도도 증가하고 있다. 이러한 추가적인 시설의 경우 기술적 측면보다는 주로 경제성의 확립여부에 대한 논란이 있어 왔다. 또한 쓰레기 소각시설의 경우에는 소각시 발생하는 열원을 이용하여 증기터빈에 의한 전력생산과 폐열을 열원으로 이용하는 방법과 단순히 열원으로만 이용하는 경우가 있다.

한편 에너지 공급시설로는 가스터빈과 증기터빈에 의한 열병합발전시설과 보조보일러가 선정될 수 있는데, 발전 후 발생하는 폐열은 회수되어 열원으로 이용되고 있다. 이들 시설의 에너지원으로는 주로 유류나 고체연료 등 주로 화석연료가 사용되는데 도시지역에서는 환경적인 측면을 고려하여 도시가스가 사용되고 있다.

이와 아울러 냉방용 열원을 생산하기 위해 전기구동 냉동기와 비전기식 냉동기 등이 필요하며, 부족한 전력의 공급 및 비상시의 수요를 위해 상용전력계통으로부터 전기에너지를 공급받음과 동시에 상용전력계통으로의 전력판매도 가능하다. 이상에서 기술한 시스템에 적절한 가정에 의해 해석모델을 설정하였으며 이와 같은 복합화된 도시기반 공급·처리시스템의 개략도를 Fig.1에 도시하였다.

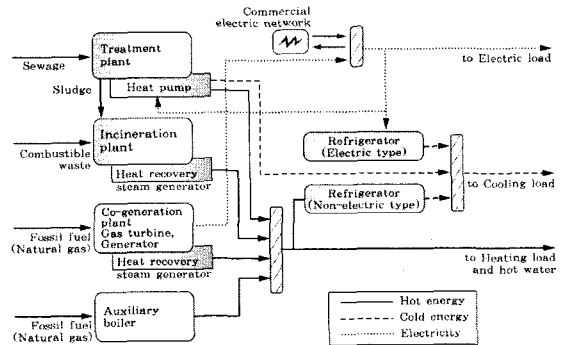


Fig.1 Schematic diagram of mathematical model

2.2 지배방정식 및 제약식

앞에서의 해석모델에 대해 시스템 최적화 문제를 풀기 위하여 모형이 간단명료하고 해법이 잘 개발되어 있는 선형계획법을 사용하였다. 일반적인 선형계획법은 목적함수와 제약식을 가지고 있으며, 목적함수는 1차식의 형태를 지니고 제약식은 연립1차부등식의 형태를 지니고 있다.

먼저 도시지역의 건물/단지에 소요되는 각종 에너지의 공급을 위해 열펌프, 소각폐열보일러, 가스터빈, 보조보일러, 흡수식냉동기, 터보냉동기 등 n 개의 기기들이 사용될 수 있다고 생각한다. 이때 각 기기의 출력은 다음의 식으로 선형화시킬 수 있다.

$$y_i = a_i x_i \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (1)$$

또한 각 기기의 설치비는 다음과 같이 선형화될 수 있다.

$$\begin{aligned} z_i &= b_i y_i \\ z_i &= b_i a_i x_i \end{aligned} \quad (2)$$

따라서 연간경상비와 연간고정비의 합인 목적 함수는 다음의 식으로 표현할 수 있다.

$$\min \sum_{m=1}^{12} \left[\sum_{h=1}^H (c_1 x_1 + c_2 x_2 + \dots + c_n x_n)_h \times \frac{24}{H} \right] \times 30 + (a_1 b_1 x_1 + a_2 b_2 x_2 + \dots + a_n b_n x_n) \times 0.11683 \quad (3)$$

여기서 30은 30일을 의미하며, 0.11683은 이자율이 8%이고 내용년수가 15년일 때의 자본회수 계수이다. 연간고정비에서는 잔존가를 고려하지 않았다. 식 (3)에서 c_i, a_i, b_i 등은 상수이므로 간단하게 식 (4)와 같이 표현될 수 있다. 제약식은 에너지부하(D_E, D_C, D_H)를 만족시키는 식과 각 기기의 입력값의 제한값으로 식 (5)~(8)로 표현될 수 있다.

$$\min a_1 x_1 + a_2 x_2 + a_3 x_3 + \dots + a_{n,h,m} x_{n,h,m} \quad (4)$$

$$s. t. a_1 x_1 + a_1 x_1 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n \geq D_E \quad (5)$$

$$a_1 x_1 + a_1 x_1 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n \geq D_C \quad (6)$$

$$a_1 x_1 + a_1 x_1 + a_1 x_1 + \dots + a_n x_n \geq D_H \quad (7)$$

$$x_{i, \min} \leq x_j \leq x_{i, \max} \quad (8)$$

$$x_i \geq 0, \quad \forall i$$

2.3 해석방법

먼저 소비시설의 규모와 용도별 분포를 파악하여 최대부하를 계산하고, 쓰레기 처리시설과 열펌프의 용량을 선정하여 그 밖의 기기들의 용량을 산정하였다. 해석알고리즘은 단체법(simplex method)를 사용하였으며, 초기투자비를 경상비로 나타내기 위하여 연등가비용법을 사용하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 에너지 부하량의 변화

기존 에너지 부하량은 최근에 국내에서 건설된 복합건물의 설계 최대부하량을 참고하여 전력부하는 19MW, 냉방부하는 40MW, 난방 및 급탕부

하는 16MW로 설정하였다. 먼저 에너지부하량의 변화에 따른 시스템 구성 및 경제성 검토를 위해 열펌프와 소각폐열을 도입하지 않았을 경우의 에너지 부하증가에 따른 구성기기의 변화와 연간경상비를 계산하였다.

Fig.2는 난방 및 급탕부하의 변화에 따른 가스 터빈과 보조보일러의 용량변화와 수전량의 변화를 도시한 것으로, 난방부하가 10MW에서 15MW로 증가함에 따라 보일러의 용량이 증가하게 되고 다시 난방부하가 20MW까지 증가하게 되면 가스터빈의 도입으로 보조보일러의 용량이 급격하게 감소하고 가스터빈의 발전으로 인하여 수전량도 감소함을 볼 수 있다. 또한 난방부하가 30MW까지 증가하게 되면 가스터빈은 3대까지 추가 도입되고 수전량은 계속해서 감소하여 초기의 56%까지 감소하게 된다.

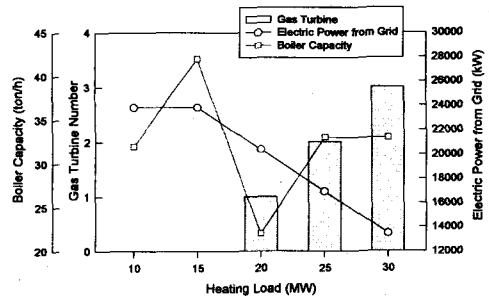


Fig.2 Variations of the system configuration and the amount of electricity from commercial grid with heating load

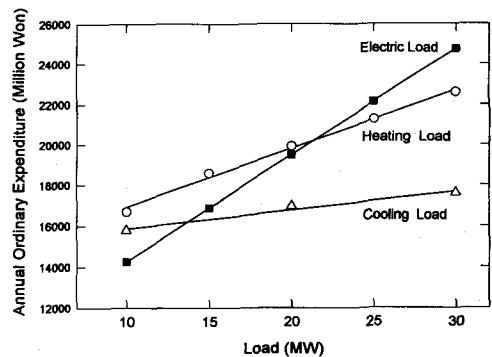


Fig.3 Variations of the annual ordinary expenditure with various energy loads

Fig.3은 에너지부하의 증가에 따른 연간경상비의 변화를 도시한 것으로, 연간경상비는 다른 중

류의 부하에 비해 전력부하의 증가에 가장 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 부하가 증가함에 따라 연간경상비는 전력부하의 경우에는 73.7% 증가하였고, 난방 및 급탕부하는 35.4%, 냉방부하는 11.5% 증가함을 보여주고 있다. 따라서 전력부하를 가능한 줄일 수 있도록 단지를 구성하는 것이 바람직한 것으로 판단된다.

3.2 미활용에너지의 도입효과

에너지공급시스템에 수열원 열펌프와 쓰레기 소각폐열의 도입에 따른 효과를 분석하였다.

Fig.4는 열펌프의 용량변화에 따른 시스템 기기 구성의 변화와 수전량 및 연간경상비를 도시한 것이다. 열펌프의 용량이 증가함에 따라 가스터빈과 흡수식냉동기의 대수가 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 이는 열펌프의 용량증가로 인해 냉난방용 열원이 증가하게 됨으로써 에너지수요를 만족시키는 범위 안에서 가스터빈과 흡수식냉동기의 초기투자비가 상대적으로 높기 때문인 것으로 생각된다.

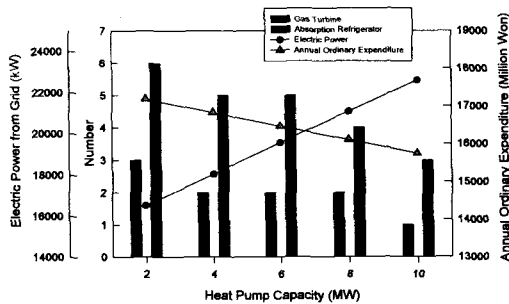


Fig.4 Variations of the system configuration, and the annual ordinary expenditure with the heat pump capacity

또한 가스터빈 대수의 감소와 전력을 사용하는 열펌프의 용량증가로 인하여 수전량이 37%정도 증가함을 알 수 있다. 그러나 열펌프의 용량증가와 수전량의 증가에도 불구하고 연간경상비는 감소함을 볼 수 있는데, 이는 상대적으로 높은 초기투자비의 가스터빈과 흡수식냉동기의 대수가 감소하기 때문이다. 결국 열펌프의 용량이 2MW에서 10MW로 증가함에 따라 에너지부하를 만족시키면서 연간경상비는 14.5억원 정도 절약할 수

있어, 열펌프의 도입은 전체 시스템 구성에 경제적으로 상당히 긍정적인 효과를 가져다 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig.5는 소각처리시설 및 열펌프의 용량에 따른 연간경상비의 변화를 도시한 것이다. 이 때 쓰레기 발열량은 1400kcal/kg으로 가정하였고 시설용량대비 실제 쓰레기 처리율은 40%로 가정하였다. 먼저 쓰레기 처리용량이 증가함에 따라 연간경상비는 지속적으로 감소하여 처리용량이 400ton/day일 때는 폐열을 도입하지 않는 경우보다 연간경상비를 15.9억(8.4%)까지 절감할 수 있음을 볼 수 있다. 또 열펌프를 도입하는 경우에는 2MW급의 저용량의 범위에서는 급격하게 연간경상비가 감소하며 그 이후에도 완만하게 연간경상비가 감소함을 알 수 있다. 10MW의 열펌프를 설치한다면 열펌프를 설치하지 않은 경우와 비교할 때 연간경상비를 32.3억원(17%)까지 절감할 수 있다.

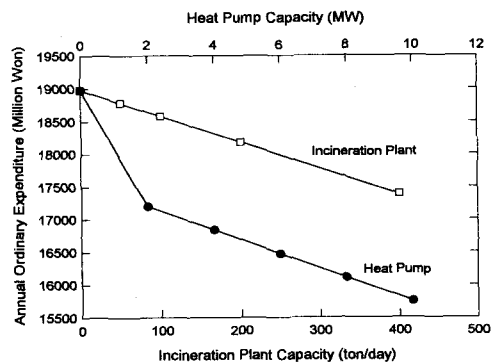


Fig.5 Variations of the annual ordinary expenditure with the capacities of the incineration and the heat pump systems

Fig.6은 소각폐열 도입단가에 따른 연간경상비의 변화를 도시한 것으로, 쉽게 예측할 수 있는 바와 같이 폐열의 도입단가가 증가함에 따라 경상비는 증가함을 보여주며, 폐열의 도입단가가 400원/Gcal일 때보다 100원/Gcal일 때 연간경상비는 6.1억원을 절약할 수 있음을 알 수 있다.

Fig.7은 소각처리시설의 용량에 따른 에너지절약율과 가스소비량의 변화를 도시한 것으로, 일반적으로 소각폐열의 도입량이 증가함에 따라 가스소비율은 감소함으로써 에너지절약율은 증가함

을 볼 수 있다. 예를 들어 시설용량이 400ton/day일 때 가스소비량은 61%까지 감소하게 되어 에너지절감액은 460천원/hour에 달한다.

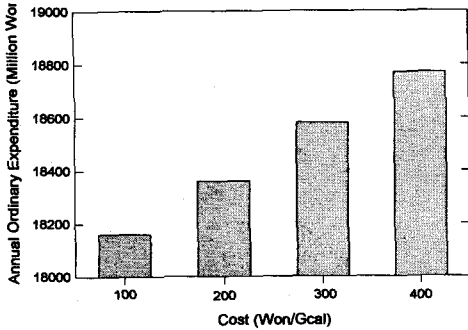


Fig.6 Variations of the annual ordinary expenditure with the cost of waste heat by incineration

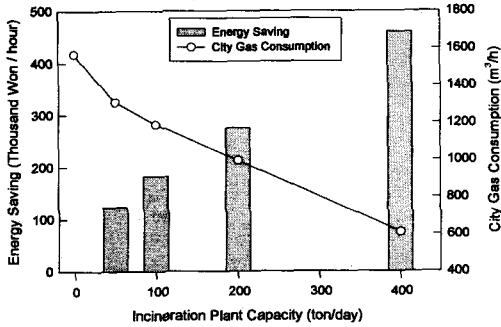


Fig.7 Variations of the energy saving and the gas consumption rate with the incinerator capacity

3.3 단지의 용도별 구성변화

단지의 용도별 구성에 따른 시스템 구성의 변화를 규명하기 위하여 먼저 Table 1에 보인 바와 같이 최대부하 원단위를 설정하였고, 또 Table 2와 같이 용도별 면적을 파라미터로 하여 수치실험을 수행하였다.

Table 1 Maximum loads per unit time and area of building by use
(Electricity: W/m², Heat: kcal/m² · h)

	Official	Commercial	Residential	Hotel	Hospital
전력	100	140	50	90	120
냉열원	140	157	40	77	96
온열원	210	140	60	205	270

CASE 1에 대해 4MW급의 열펌프와 2.7MW급 (100t/d)의 폐열을 공급받을 때의 건물연면적 변화에 따른 시스템의 구성은 Table 3과 같다.

Table 2 Area ratios by use of the several complexes

	Official	commercial	Residential	Hotel	Hospital
CASE1(%)	60	10	10	10	10
CASE2(%)	10	60	10	10	10
CASE3(%)	10	10	60	10	10

Table 3 Variations of the system configurations with total area

	Area (m ²)	100,000	200,000	300,000	400,000
Gas turbine	2.8MW	3	4	4	4
	6.5MW	-	2	4	4
Aux. boiler	3t/h	-	-	-	-
	10t/h	-	-	-	2
Refrigerator (Electric)	670USRT	1	4	4	4
	1010USRT	3	4	4	4
Refrigerator (Non-elec.)	700USRT	-	1	4	4
	1,000USRT	-	-	2	4
Heat pump		4MW			
Waste heat		2.7MW			
Electricity from grid (kW)		4,127	4,414	1,922	6,971

Fig.8은 4MW급의 열펌프와 소각용량 100t/d의 폐열을 공급받는 경우 단지의 용도별 구성변화에 따른 단위시간당 에너지비용과 연간경상비의 변화를 도시한 것이다. 연간경상비는 에너지 원단위가 낮은 거주시설 위주로 구성되어 있는 CASE 3가 가장 낮은 값을 보이고, CASE 1과 CASE 2는 거의 에너지 원단위가 비슷하므로 비용의 변화가 크지 않음을 볼 수 있다. 에너지비용은 가스비용이 전체 에너지소비의 상당부분을 차지하고 있음을 볼 수 있다.

Fig.9는 건물연면적에 따른 단위시간당 에너지비용과 연간경상비의 변화를 도시한 것으로, 연면적이 증가함에 따라 각종 에너지비용이 증가하는 경향을 보여주고 있다. 특히 연면적 300,000m²에서 수전량이 감소함을 볼 수 있는데, 이는 가스터빈이 6대에서 8대로 증가함에 따라 가스터빈에서 충분한 전력을 공급하기 때문으로 판단된다. 또 가스터빈의 용량이 8.4MW~37.2MW로 크게 증가함에 따라 가스터빈에 공급되는 가스소비량이 수전량에 비해 급격하게 증가함을 볼 수 있다. 연면적 300,000m²에서는 가스터빈 운전비

용이 전체 에너지비용의 97%를 차지하고 있다. 연간경상비는 단위면적당 123,360원/m²이며, 연면적이 100,000m²에서 400,000m²로 증가함에 따라 연간경상비는 75.7% 증가하였다.

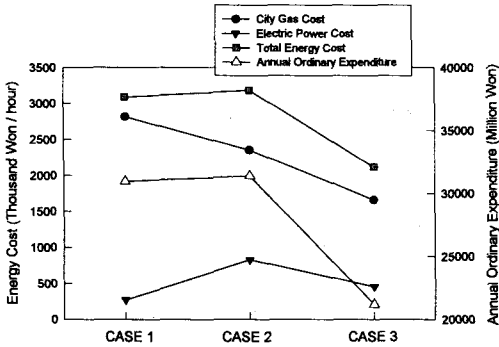


Fig.8 Variations of the energy consumption and the annual ordinary expenditure with the area ratios by use

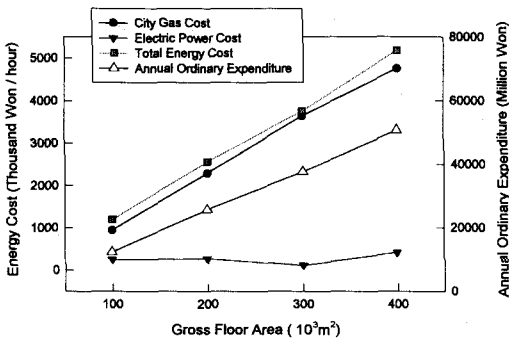


Fig.9 Variations of the energy consumption and the annual ordinary expenditure with the total area

4. 결론

도시지역에서의 자원 및 에너지 공급·처리시설의 최적설계 및 운영에 필요한 자료를 제공하기 위해 각종의 자원 에너지 부하에 따라 최적의 시스템의 구성 즉 기기의 종류, 용량 및 운전패턴 등을 결정할 수 있게 해주는 시스템 수치해석 방법을 개발하고 각종 변수의 변화에 따른 시뮬레이션을 수행한 결과 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 부하량 및 부하패턴의 변화에 따른 초기투자

비 및 운전비 등 경제성과 기기구성의 특성 및 운전형태를 고찰하였고, 미활용에너지의 도입방안 및 효과를 분석하였다.

2) 연간경상비는 다른 종류의 부하에 비해 전력 부하의 증가에 가장 급격하게 증가하므로 도시 및 단지의 설계시에 가능한 전력부하를 줄일 수 있도록 단지를 구성하는 것이 바람직하다.

3) 수열원 열펌프와 소각폐열을 이용함으로써 상대적으로 초기투자비가 상대적으로 높은 가스 터빈이나 흡수식 냉동기 등의 도입을 억제하면서 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 각종 원단위를 이용하여 도시지역에서의 건물과 시설의 용도별 면적 또는 시설용량의 변화에 따른 효과적인 시스템 구성방법에 대하여 논하였으며, 이는 도시지역의 에너지 공급설비의 최적설계 및 운영을 위해 사용될 수 있을 것이다.

참고문헌

- (1) I.E. Grossmann, Optimal multiperiod operational planning for utility systems, Computers chemistry Engineering, Vol.21, No.8, pp.787-800, 1997.
- (2) J.C.Bruno et al., Optimization of energy plants including water/lithium bromide absorption chillers, International J. of Energy Research, Vol.24, pp.695-717, 2000.
- (3) Stig-Inge Gustafsson, Optimization and simulation of building energy systems, Applied Thermal Engineering, Vol.20, pp.1731-1741, 2000
- (4) 이태원 외, 지하공간을 이용한 혐오시설의 복합 플랜트화, 한국건설기술연구원, 연구보고서 R&D/99S01-01, 2000.
- (5) 권용호 외, 선형계획법을 이용한 가스터빈 열병합시스템의 최적계획에 관한 연구, 대한기계학회 추계학술대회논문집, pp.711-717, 1995.
- (6) 이태원 외, 중·소형 열병합 발전시스템의 적용에 관한 연구, 한국건설기술연구원, 연구보고서 건기연98-081, 1998.
- (7) 박순달, Operations Research, 민영사, pp. 32-170, 2000.