

# 건물용 열병합발전 시스템의 적정규모 산정을 위한 최적 투자모형

박종성\*, 원선재\*\*, 김정훈\*\*, 박승호\*

\* : 홍익대학교 전기제어공학과 \*\* : 홍익대학교 전자전기공학부 \* : 홍익대학교 기계공학과

## Optimal Sizing Evaluation Model of Building Cogeneration System

Jong-Seong Park\*, Seonjae Won\*\*, Jung-Hoon Kim\*\*, Seungho Park\*

\* Dept. of Elec. & Ctrl. Engineering, Hong-Ik University  
 \*\* Dept. of Electrical Engineering, Hong-Ik University  
 \* Dept. of Mechanical Engineering, Hong-Ik University

### Abstract

For an effective application of the cogeneration system for commercial and industrial buildings, we need to develop a relevant model to determine the long-term based optimal sizing of the cogeneration system considering electrical and thermal load demands, buy and sell contracts with electric utility and the annual production cost. In assessing the optimal sizing of cogeneration, we have to consider both economic parameters and their capacity expansion for the increased electrical and thermal demand in the future. In this paper, we propose a mathematical model for the optimal sizing of cogeneration systems considering annual production costs and other economic parameters such as, lifetime of the equipment, time value of the capital, etc. In the case study, we thoroughly examine the effects of the economic parameters and determine the optimal size of the sample system. In addition, we calculate the payback period of the cogeneration investment.

### 1. 서론

열병합발전 시스템을 건물용으로 적용할 경우 일반적으로 최적인 열은 난방 및 급탕용 온수, 냉방용 냉수와 흡수식 냉방기의 열원 또는 공정용 증기로 사용된다. 발전전용 화력발전의 경우 에너지 이용률이 30 - 35[%]에 불과한 반면, 열병합발전 시스템은 입력 에너지의 약 75 - 85[%] 까지 유효하게 이용할 수 있다.

현재 한국은 전력 수요가 꾸준히 증가하는 추세에 있고 앞으로는 더욱더 증가할 것으로 예상된다. 또한, 전력의 대규모화, 입지 확보의 문제 등으로 전력의 공급은 재정 및 기술면에서 여러 가지 어려움이 있다. 국내에서 운전중인 전력 열병합발전 시스템은 도입이 부진한 실정이나, 최근 소형 열병합발전 시스템에서 고조되고 있으므로 이에 따른 기술적, 경제적 분석이나 발전전용을 위한 정보와 분석방법에 대한 필요성이 높아지고 있다. 따라서 건물용 소형 열병합발전의 보급확대와 효과적인 이용을 위하여 최적용량 및 투자계획을 통하여 경제성을 확보 하는 것이 중요하며 열부하와 전기부하를 만족하며 총비용을 최소 하는 장기적 안목의 최적 규모 산정 계획 수립이 필수적이라고 할 수 있다. 이에 본 논문에서는 기술적인 요소와 경제적인 요소를 고려하여 최적규모를 산정하기 위한 수리모형을 제시하였으며 사례연구에서는 현재 한국에서 활발하게 보급이 추진중에 있는 가스엔진 열병합시스템을 대상으로 최적규모를 계산해 보았다. 또한 가스엔진의 용량별 투자비와 운전비를 계산하여 경제성을 평가하였다. 또한 계산결과를 정수화하여 실질적인 투자에 도움이 되도록 하였다.

### 2. 시스템 설비계획 및 투자단가의 계산

열병합발전 시스템의 규모 산정시 시스템의 투자단가는 매우 중요한데 열병합발전 시스템의 투자단가를 계산하기 위해서는 구성기기의 용량 산정 등 전체 시스템에 대한 설비계획 및 구성 최적화가 요구된다. 본 논문에서 대상으로한 가스엔진 열병합발전 시스템의 주요 구성기기는 엔진, 발전기, 열교환기, 보일러, 냉동기를 들 수 있으며 투자단가의 산정을 위해서 각 구성기기에 대한 용량별 가격 합수를 참조하였다. 시스템 설비계획을 통하여 용량별 투자단가를 알 수 있으며 그에 따른 최적 규모를 산정하게 되며 계산 결과에 따라 다시 정확한 구성기기의 용량을 구할 수 있다. 또한 경제성의 평가를 위한 기준방식에 대해서도 설비계획을 하였는데 비상용 전원 및 예비전원으로 발전설비와 보일러, 냉동기의 용량을 산정하였다.

#### 2.1 시스템 구성기기의 용량 산정

##### 2.1.1 엔진 및 발전기의 용량 산정

초기에 엔진 및 발전기의 용량은 입력으로 주어지는 건물의 부하에 따라 대략적으로 결정하게 되며 이에 따라서 구성기기의 용량을 산정하고 시스템의 투자단가를 결정한다. 발전기의 용량은 발전기의 효율을 고려하여, 엔진 용량의 약 95% 정도로 용량을 산정하였다.

##### 2.1.2 열교환기의 용량 산정

열병합발전 시스템의 경우 엔진에서의 방열되는 열량을 회수하여 열수요에 대해 사용하게 되므로, 열교환기의 용량은 엔진의 방열량이 가장 큰 경우에 맞추어 산정된다. 일반적으로 냉각수로의 방열량과 배기가스로의 방열량은 엔진이 정적 운전상태일때 가장 많으므로, 이때의 열량값으로 각 열교환기의 용량을 산정하였다.

##### 2.1.3 보일러의 용량 산정

보일러 용량은 건물 면적별 보일러 용량 데이터를 참조하여 산정하였으며 사용된 식은 호텐의 면적에 따라 다음과 같다. 면적이 20,000m<sup>2</sup>미만의 범위에서 보일러의 용량B [1,000kca/h]는 면적 A에 의 식(2-1)로 계산되며, 면적범위가 20,000m<sup>2</sup>에서 40,000m<sup>2</sup> 사이일때는 식(2-2)을, 면적범위가 40,000m<sup>2</sup> 이상일때는 식(2-3)을 각각 적용하였다 [7].

$$B = 0.4284 A - 2500 \quad (2-1)$$

$$B = 0.1756 A + 2556 \quad (2-2)$$

$$B = 0.0345 A + 8200 \quad (2-3)$$

##### 2.1.4 냉동기의 용량 산정

냉동기의 용량은 건물 면적별 냉동기 용량 자료를 이용하였다. 이는 호텐의 모든 면적범위에 대해서 적용되었으며, 식(2-4)과 같다. 냉동기 용량 R은 [1,000USRT]이며, 면적 A는 [m<sup>2</sup>]이다 [7].

$$R = 0.0237 A + 230 \quad (2-4)$$

### 2.2 투자단가의 계산

위의 과정을 의해 엔진 및 발전기의 사이즈에 대한 구성기기의 용량이 결정되면 구성기기의 가격자료를 이용하여 전체 시스템의 용량별 가격 및 투자단가를 구할 수 있다. 또한 각 구성기기는 모두 수명기간이 다르므로 시스템의 수명기간 동안 일어나는 제투자를 고려하여 투자단가를 계산해야 한다. 이는 각 구성기기의 수명과 할인율을 이용하여 구할 수 있다. 각 구성기기의 제투자를 고려한 투자단가의 계산과정은 다음과 같다.

- (i) 각 구성기기의 초기 투자단가를 연투자단가로 환산.
- (ii) 시스템 수명기간 동안 연투자비의 발생횟수를 계산.
- (iii) 시스템 수명기간에 대한 각 기기의 투자단가를 구함.
- (iv) 각 구성기기의 투자단가를 합하여 시스템의 투자단가를 계산.

시스템의 투자단가는 초기투자비에 허가화된 제투자비를 더한 것으로 볼 수 있으며 시스템 수명기간 동안 엔진에 대한 제투자는 시스템 수명기간과 구성기 수명기간의 차이 만큼 일어나게된다. 따라서 구성기기의 제투자비 연투자비용발생횟수를 계산하여 시스템 수명기간에 대한 구성기기의 투자단가를 구할 수 있다. 위와 같은 방법으로 각 구성기기의 투자단가를 구한 후 합하면 전체 시스템의 투자단가를 구할 수 있다. 본 연구에서는 15년의 시스템 수명에 대하여 투자단가를 계산하였다. 시스템의 투자단가는 그림 2.1에서 보듯이 용량의 증가에 따라 점차 감소하는 것을 볼 수 있으며, 엔진 및 발전기 용량의 선정시 열병합발전 시스템의 전체 투자비에도 큰 영향을 미칠 것임을 지적할 수 있다.

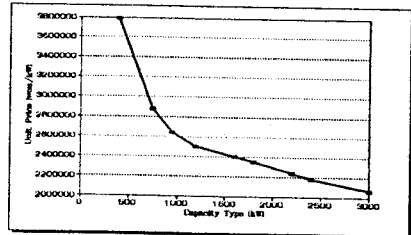


그림 2.1 설비계획에 의한 시스템의 투자단가 (흡수식 냉동기 사용시)

### 3. 최적규모 산정을 위한 수리모델

#### 3.1 투자계획의 개요

건물용 열병합발전 설비의 설치는 막대한 자금이 투입되는 항목으로 장기적인 안목에서의 건물용 열병합발전 설비에 대한 최적 투자계획은 필연적이라고 할 수 있다. 열병합발전 투자계획시 무한대기간까지 투자를 고려한다면 경우 초기 투자비와 운전비가 많이 들게 되므로 본 논문에서는 열병합 설비가 일정기간 동안만 가동된다고 가정하고 그 이후는 고려하지 않았다. 따라서 검토대상기간 말기에 발생하는 잔존가치를 비용으로 환산하여 최소화되며 경제성 분석시에도 이러한 개념은 적용된다. 또한 건물용 열병합설비는 기술적인 발전의 구배가 높은 설비로 차후에 생산되는 설비는 기존의 설비와 기술적인 면에서 매우 큰 차이가 예상된다. 이러한 면으로 생각하면 때에도 대상기간 동안만을 고려하는 모형이 적당하다고 보아진다.

#### 3.2 수리모델

최적제어 이론의 하나인 최대원리법을 적용하기 위하여 다음과 같은 수리모델을 작성하였다.

##### 3.2.1 목적함수

먼저 총비용의 성분을 수식화해야 하는데 총비용에는 운전비, 투자비, 공급지장비, 잔존가치 등의 비용 항목들이 포함된다. 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \sum_{i=1}^n [ \sum_{j=1}^m I_j U_j + OC(X_i, U_i) - \sum_{j=1}^m S(U_j) ] \quad (3.1)$$

$$\text{Subject to } X_i^{t+1} = X_i^t + U_i^t, \quad i=1, 2, \dots, n \\ U_i^t > 0$$

이때,  $T$ : 고려대상기간,  $n$ : 시스템 용량 type의 수,  $I_j$ : 1년도  $i$  type 시스템의 투자단가,  $OC(X_i, U_i)$ : 공급지장비를 포함하는 1년도의 운전비용,  $S(U_j)$ : 1년도  $i$  type 시스템의 잔존가치,  $X_i^t$ : 1년도  $i$  type 시스템의 설비용량,  $U_i^t$ : 1년도  $i$  type 시스템의 투자용량.

##### 3.2.2 최적조건

식(3.1)은 부등호 제약조건과 등호제약조건을 하나씩 가지며, 라그랑주 승수를 이용하면 목적함수를 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$L = \sum_{i=1}^n [ \sum_{j=1}^m I_j U_j + OC(X_i, U_i) - \sum_{j=1}^m S(U_j) + \sum_{i=1}^n \theta_i (X_i^{t+1} - X_i^t - U_i^t) + \sum_{i=1}^n \lambda_i U_i^t ] \quad (3.2)$$

이때,  $\theta_i, \lambda_i$ : 라그랑주 승수.

이때 first order necessary condition을 적용하여 다음과 같이 최적조건을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial L}{\partial X_i^t} = \frac{\partial H^t}{\partial X_i^t} + \theta_i = 0 \quad (3.3)$$

$$\frac{\partial L}{\partial U_i^t} = \frac{\partial H^t}{\partial U_i^t} + \lambda_i^{t+1} = 0 \quad (3.4)$$

$$\lambda_i^t U_i^t = 0 \quad (3.5)$$

$$\lambda_i^{t+1} \geq 0 \quad (3.6)$$

위의 식을 정리하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\frac{\partial OC^t}{\partial X_i^t} - \theta_i^{t+1} + \theta_i^t = 0 \quad (3.7)$$

$$\theta_i^t = - [ \sum_{j=1}^m \frac{\partial OC^j}{\partial X_i^j} ] \quad (3.8)$$

식(3.7)을 보조방정식이라고 하며 이를 만족시키는 부등호제약 조건에 Kuhn-Tucker 조건을 적용하여 최적 조건을 구할 수 있다. 식(3.8)의  $\theta_i^t$ 는  $i$  type 시스템의 유효가치로 볼 수 있다.

#### 3.3 설비한계비용

설비한계비용은 설비가 한단위 증가하였을 때 운전비와 공급지장비의 증분 비용으로 설비 투자 결정에 중요한 지표로 사용되며, 운전비용 [5]으로부터 계산될 수 있다. 본 논문에서 설비한계비용을 다음과 같이 정의하였으며 운전모형으로부터 발전기 출력에 대한 확률 사건  $np$ , 시간구간  $m$ 에 대한 설비한계비용  $MC_i^{np, m}$  값을 구할 수 있다.

$$\frac{\partial OC^t}{\partial X_i^t} = MC_i^t = \sum_{m=1}^{NP} \sum_{np=1}^{NP} s_{np} \cdot MC_i^{np, m} \cdot \Delta T_{m, i} \quad (3.9)$$

이때,  $MC_i^t$ : 1년도  $i$  type 시스템의 설비한계비용,  $NP$ : 발전기의 대수,  $s_{np}$ : 사건  $np$ 가 일어날 확률,  $NT$ : 전체 구간수,  $\Delta T$ : 구간의 지속시간.

#### 3.4 투자여부 결정

$S(U_i)$ 는 투자용량  $U_i$ 에 대한 잔존가치를 나타내므로  $\partial S(U_i)/\partial U_i$ 는 투자단가에 대한 잔존가치가 되며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial S(U_i)}{\partial U_i} = I_i' = [1 - \frac{Y_i}{L_i}] I_i \quad (3.10)$$

이때,  $I_i'$ : 시스템  $i$ 에 대한 1년도의 투자단가 [원/kW],  $Y_i$ : 계획대상기간 중 사용기간 [년],  $L_i$ : 열병합 시스템의 수명 [년]

투자여부는 한단위 투자에 의한 비용  $S(U_i)$ 와 한단위 투자에 대한 잔존가치  $\partial S(U_i)/\partial U_i$ , 그리고 한단위 투자에 의한 운전비와 공급지장비의 감소효과  $\theta_i^t$ 를 비교하여 결정하게 된다. 각 경우는 다음과 같다.

- (i)  $I_i' - \theta_i^t > 0$ : 비경제적 투자하지 않음.
- (ii)  $I_i' - \theta_i^t = 0$ : 최적 상태, 더이상 투자하지 않음.
- (iii)  $I_i' - \theta_i^t < 0$ : 투자하면 이익이 발생, 계속 투자.

따라서,  $\theta_i^t - (I_i' - I_i^t)$ 를 한계투자수익으로 볼 수 있으며 이 값이 0이상 일때 투자를 수행하게 된다.

#### 3.5 최적규모 계산과정

최적용량  $U_i^t$ 를 결정하기 위한 최적화 기법으로 최대경사법(steepest descent method)을 사용하였다. 앞에서 설명한 바와 같이 투자는 한계투자수익에 따라 진행하여야 한다. 따라서 결정해야 할 문제는 한계투자수익이 양인 경우 얼마만큼의 투자를 해야하는가이다. 이때 투자수익은 주어진 제약조건을 만족하면서 목적함수를 감소시키는 경사방향(gradient)이 된다. 경사방향으로 얼마만큼 진행할 것인가를 결정하기 위하여 step의 크기를 다음과 같이 정하였다.

$$\alpha = \theta \cdot K_i^t \quad (3.11)$$

투자용량의 증감은 제약조건을 만족하면서 최대의 수익을 얻는데 있으므로 증감의 크기는 상대투자수익을  $(\theta_i^t - (I_i' - I_i^t)) / (I_i' - I_i^t)$ 에 비례하고 매년 증가하는 수요를 고려한다면 추가발전용량  $\Delta P^t$ 에 비례해야 한다.

따라서,  $K_i^t$ 는 다음과 같이 결정될 수 있다.

$$K_i^t = \frac{\Delta P^t}{I_i' - I_i^t} \quad (3.12)$$

위의 과정을 요약하면 다음과 같다.

- (i)  $U_i^t$ 를 이용하여  $X_i^{t+1}$ ,  $\theta$ 를 구한다.
- (ii) 보조 방정식으로 부터  $\theta$ 를 계산
- (iii) 최적 용량 증분  $U_i^t$ 를 계산
- (iv) 최적 조건이 만족 될때까지 위의 과정을 반복.

위의 과정에 따라  $i$  type 가스엔진 열병합발전 시스템의 최적규모를 산정할 수 있는데 결과값은 실수로 나타내게 된다. 그러나 실수에는 실제 적용에 어려움이 따르고 또한 용량 type은 모든 경우에 대해 존재하지 않으므로 발전기의 대수를 계산하여 이를 정수화 하였다. 정수화 기법으로는 분지한계법(branch and bound method)을 이용하였으며 각 계산과정은 다음과 같다.

- Step 1. 용량 type과 최적 용량을 이용하여 발전기의 대수를 계산.
- Step 2. 발전기 대수가 정수이면 stop.
- Step 3.  $U_i$ 에 제약조건을 추가하여 분지한계법을 실행한다.
- Step 4. 최적 정수해가 얻어지면 stop, 그외의 경우 다시 step 3으로
- Step 5. 최적 정수해를 이용하여 시스템 구성 및 경제성 분석을 실행.

위의 결과를 이용하여 시스템의 투자비용을 계산하고 기존방식의 시스템과 비교하여 투자 회수기간을 계산할 수 있다. 경제성의 분석에는 현행 제도에 의해 지원되는 용자 및 상환조건을 고려하여 총비용을 계산하였다. 전체적인 흐름을 다이어그램으로 나타내면 다음과 같다.

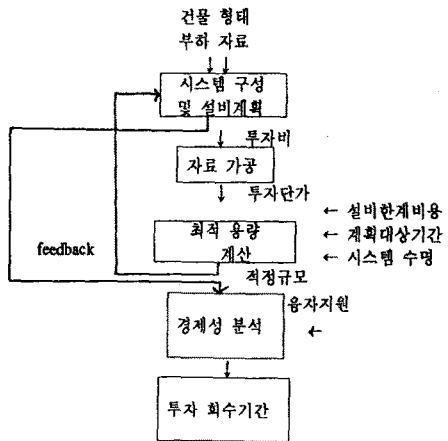


그림 3.1 전체 흐름도

#### 4. 사례 연구

사례 연구에서는 여러가지 용량에 대해서 최적 규모를 산정하여 보았는데 같은 종류끼리만 설치하는 경우와 용량이 다른 엔진/발전기를 혼합하는 경우에 대하여 결과를 비교해 보았다.

##### 4.1 입력자료

시스템 입력자료는 정적 운전상태를 가정하였고 부하는 대상 건물의 계절별 부하패턴을 이용하였다. 또한 냉방에는 흡수식 냉동기를 사용한다고 가정하였다.

표 4.1 비용 자료 [원/kWh]

a <sub>i</sub>	b	c		f
		하계	타계	
65	21	75	52	210

표 4.2 시스템 자료 및 경제 자료

열전비	선로의 손실계수	발전기의 사고정지율	보조보일러 용량	분석 대상기간	시스템 수명	할인율
1.5	0.02	0.2	10,000[kW]	10 [년]	15[년]	12[%]

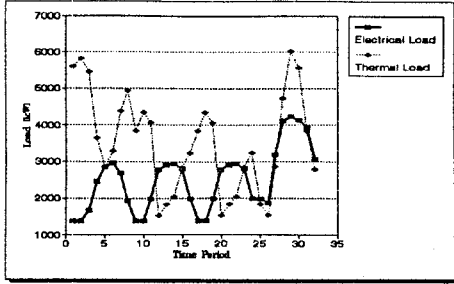


그림 4.1 각 구간의 전기부하와 열부하

#### 4.2 결과 검토

그림 4.2와 표 4-3은 각 용량별 최적 규모를 나타낸다. 표 4.3과 그림 4.2에서 1600 [kW], 발전기 1대가 최적 정수해임을 알수있으며 여러가지 용량을 혼합하여 투자하는 경우에도 같은 비슷하게 나타나지만 몇가지에 분산되는 것을 그림 4.4에서 볼 수 있다. 이 경우에 분지한정법을 이용하여 정수화했을때 결과는 동일하게 나타난다. 최적 정수해에 의해 시스템을 설계한 결과를 표 4.4에 나타냈고, 표 4.5에서 이때의 투자 회수기간을 계산하였다. 그림 4.5에서는 설비한계비용이 초기치로부터 감소하는것을 볼 수 있다.

표 4.3 시스템 정수규모 산정결과

Type [kW]	최적 규모 [kW]	발전기대수 (실수)[대]	발전기대수 (정수)[대]	최적 정수 규모	총비용 [백만원]
400	2038.89	5.09	5	2000	22,514
750	2599.05	3.46	3	2250	21,154
950	2988.90	3.14	3	2850	21,640
1200	2992.56	2.49	2	2400	20,632
1600	3090.02	1.93	1	1600	19,600
1800	3008.18	1.67	1	1800	19,701
2200	3221.06	1.46	1	2200	19,972
2400	3227.13	1.34	1	2400	20,133
3000	3582.42	1.19	1	3000	20,792

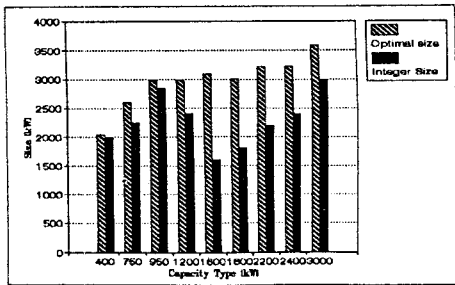


그림 4.2 각 용량별 최적해와 정수해

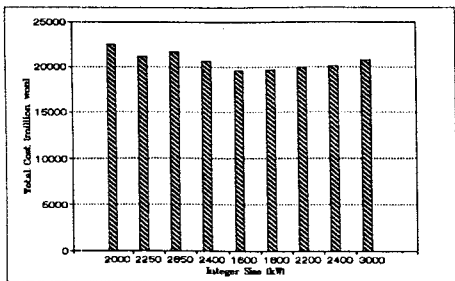


그림 4.3 각 경우의 총비용

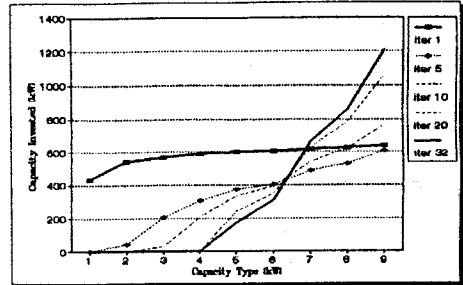


그림 4.4 다른 용량을 혼합하는 경우 계산 반복횟수에 따른 투자량의 변화

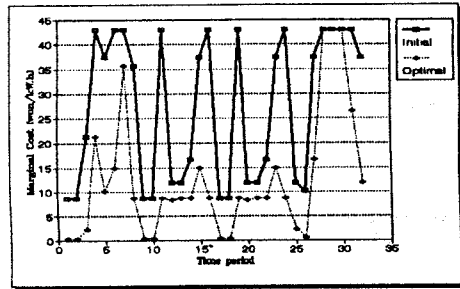


그림 4.5 설비한계비용의 변화

표 4.4 최적규모에 따른 시스템 설계 결과

	열병합시스템	기존방식
연전	1,777 [kW]	996 [kW]
발전기	1,600 [kW]	897 [kW]
열교환기1	1.42e+08 [Kcal/h]	0 [Kcal/h]
열교환기2	1.11e+08 [Kcal/h]	0 [Kcal/h]
보일러	7.26e+06 [Kcal/h]	1.101e+07 [Kcal/h]
냉동기	6.71e+02 [RT]	1.07e+03[RT]
시스템 투자비	3,760 [백만원]	3,380 [백만원]
연간 운전비	1,203 [백만원]	2,405 [백만원]

표 4.5 경제성 분석 결과

	투자비 [백만원]	연간운 전비 [백만원]	이자 지불액 [백만원]	총비용 [백만원]	연간편익 [백만원]	회수기간 [년]
열병합 시스템	3,760	1,203	516	12,265	633	6.52
기존 시스템	3,380	2,405	0	18,599		

#### 4. 결론

본 논문의 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (i) 장기적 관점의 최적 규모 산정을 위한 수리모델을 제안 하였으며 이를 통하여 가스연전 열병합발전 시스템의 최적 용량을 계산해 보았다.
- (ii) 최적 운전 모형으로부터 투자의 중요한 정보로 이용되는 설비한계비용을 계산하였다.
- (iii) 보다 실질적인 투자에 도움이 되기위해 정수화 기법을 도입하여 최적 정수해를 계산하였다.
- (iv) 투자단가를 정확히 산정하기 위하여 시스템 설계계획 및 구성기기의 용량 산정을 하였다.

#### 참고 문헌

- [1] M. S. Bazaraa, et al., Nonlinear Programming, John Wiley & Sons, 1979.
- [2] S. D. Hu, Cogeneration, Prentice-Hall, 1985.
- [3] A. C. Chiang, Elements of Dynamic Optimization, McGRAW-HILL, 1992.
- [4] J. A. Bloom, "Long-Range Generation Planning Using Decomposition and Probabilistic Simulation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982.
- [5] 최석현, 최중기, 김정훈, 이봉용, "다기 발전기를 채용한 건물용 열병합시스템에서 최적규모산정을 위한 확률적 최적운전 모형", 1994년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집(3), pp. 840-842, 1994. 8.
- [6] 김정훈, 고민재, 박중성, "건물용 열병합발전 설비의 효과적인 투자를 위한 현 제도의 개선방향 모색에 관한 연구" 1994년도 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 18-20, 1994. 11.
- [7] 사단법인 대한건축학회 "건축학요설", 건축학요설편집위원회, 1988.
- [8] 한국전력공사, "MNI모형을 활용한 장기 전원개발계획에 관한 연구", 1988.12.