

# 가변 열전비를 갖는 열병합 발전설비가 포함된 마이크로그리드의 최적 운용

## Optimal Microgrid Operation Considering Combined Heat and Power Generation with Variable Heat and Electric Ratio

이 지 혜\* · 박 재 세†  
(Ji-Hye Lee · Je-Se Park)

**Abstract** - The important requirement for microgrid operation is to meet the balance between supply and demand. To meet, Combined Heat and Power (CHP) generation should be considered in microgrid scheduling. CHP generation is economical on the side of a consumer because it products heat and power. Therefore, it is high efficient. This paper presents a mathematical model for optimal microgrid operation including CHP generation using the optimal ratio of heat and power due to demand. The objective function and constraints are modeled by linear program (LP). Through the case study, the validation of the proposed model is shown.

**Key Words** : Microgrid, optimal operation, CHP(Combined Heat and Power) generation

### 1. 서 론

최근 지속적으로 증가하는 에너지 수요와 고유가에 따라 에너지 이용의 합리화에 대한 관심이 고조되고 있으며 그 중 신재생 전원을 주 전원으로 하는 소규모 전력 시스템인 마이크로그리드의 효율적인 에너지 수요관리를 위해서 많은 연구가 이루어지고 있다[1-6]. 마이크로그리드의 운용에 있어서 중요한 요구사항은 에너지의 공급과 수요의 균형을 맞추는 것으로 전력의 경우는 분산 전원을 이용하여 전력부하에 전력을 공급하고 추가적으로 초과/부족 전력은 전력시장과 거래하거나 저장장치에 충/방전함으로써 마이크로그리드의 최적 운용계획을 수립할 수 있다[7]. 한편, 열에너지의 경우 열부하는 에너지 이용 효율이 높은 열병합 발전기와 전 용보일러에서 공급된다. 열병합발전(Combined Heat and Power; CHP)은 열과 전기를 동시에 생산하여 활용함으로써 효율성을 높이는 방전방식으로, 열과 전기를 정해진 비율(열전비)로 생산이 가능하다[8-10]. 또한, 열병합발전설비에서 구간별 열전비를 최적화함으로써 수요량에 따른 열과 전기를 최적으로 생산할 수 있으며, 그에 따른 마이크로그리드는 거래가격과 발전단가를 고려하여 비용의 최소화를 위해 거래 계획을 결정하고 필요에 따라서 전력저장장치로 충·방전하여 최적운용이 가능하다. 이러한 이유로 열병합발전은 전력과 열을 동시에 사용하는 마이크로그리드에 많은 도입이

예상된다.

따라서 본 논문에서는 신재생 전원, 분산저장장치 그리고 부하로 이루어진 기존의 마이크로그리드 내에 에너지 효율이 높은 열병합 발전설비를 도입함으로써 경제적인 측면에서 최적운용이 가능함을 수리적 모델을 정식화하여 검토하고자 한다. 사례연구를 통하여 가변 열전비를 가지는 열병합 발전기에 대하여 선형계획법에 기반을 둔 최적운용계획을 수립하고 그에 대한 타당성을 검토하고자 한다.

### 2. 마이크로그리드 운용

그림 1과 같이 마이크로그리드는 distributed generation systems (DGs), distributed storage systems (DSs) 및 부하로 구성되는 소규모 에너지 시스템으로 DG는 연료를 사용하는 디젤발전기, 열병합발전기와 풍력발전, 태양광발전과 같이 제어가 어려운 신재생발전원으로 구성되며 부하는 전력부하와 열부하로 구성된다[1,2]. 마이크로그리드는 전력계통에 연계되어 운전(the grid-connected mode)할 수 있으며 계통상황에 따라 독립적으로 운전(the islanded mode)할 수 있다. 또한, 마이크로그리드 운용을 위해서는 최소한의 비용으로 에너지의 공급과 수요의 균형을 유지하는 최적 운용이 중요하며 이는 최적운용계획에 관한 문제로 귀결된다. 마이크로그리드의 최적운용계획이란 K개의 시간구간에 대하여 각 구성요소들의 제약조건들을 만족시키는 조건하에서 마이크로그리드의 운용비용을 최소화시키고 마이크로그리드의 순이익을 최대화시키는 운용계획이다.

\* 준 회원 : 인천대 공대 전기공학과 석사과정

† 교신저자, 정회원 : 인천대 전기공학과 교수

E-mail : js8700@incheon.ac.kr

접수일자 : 2012년 8월 20일

최종완료 : 2012년 9월 12일

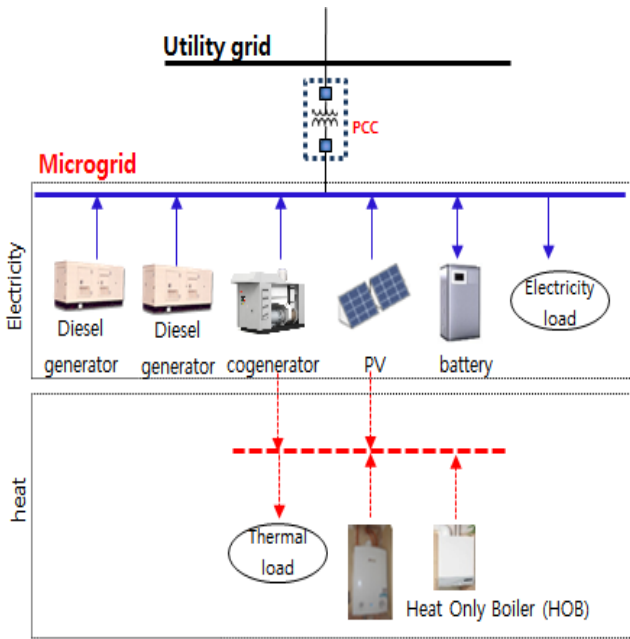


그림 1 마이크로그리드 구성  
Fig. 1 Microgrid configuration

### 3. 최적 운용 정식화 모델

본 논문에서는 가변 열전비를 갖는 열병합 발전설비가 포함된 마이크로그리드의 최적 운용을 위한 수리적 모델을 선형계획법에 의거하여 정식화하였다. 제시된 목적함수는 마이크로그리드의 발전비용에서 수익을 차감한 순이익을 최소화시키도록 식 (1)과 같이 나타내었다. 식 (1)의 첫째 항은 디젤 발전기에서의 발전비용을 나타내고 둘째 항은 열병합 발전기에서의 발전비용, 셋째 항은 전용보일러에서 발생하는 열 생산비용, 넷째 항은 전력시장으로부터 전력을 구입하여 발생한 비용, 마지막 항은 전력시장으로 전력을 판매하여 발생하는 수익을 각각 나타낸다.

$$\begin{aligned}
 Min C = & \sum_{k=1}^K \left( \sum_{i=1}^M C_{-i} \cdot P_{DSG-i} + \sum_{j=1}^N C_j \cdot P_{COG-j} \right) \\
 & + \sum_{q=1}^Q C_{-q} \cdot P_{HOB-q} + PR_{B-k} \cdot P_{B-k} - PR_{S-k} \cdot P_{S-k} \quad (1)
 \end{aligned}$$

여기서,

k = 일일 운용구간을 나타내는 식별자

K = 일일 운용구간 수

i = 디젤 발전기를 나타내는 식별자

M = 디젤 발전기 수

j = 열병합 발전기를 나타내는 식별자

N = 열병합 발전기 수

q = 전용보일러를 나타내는 식별자

Q = 전용보일러 수

$C_{-i}$  = i번째 디젤 발전기의 발전단가[원/kWh]

$P_{DSG-i}$  = i번째 디젤 발전기의 발전량[kWh]

$C_j$  = j번째 열병합 발전기의 발전단가[원/kWh]

$P_{COG-j}$  = j번째 열병합 발전기의 발전량[kWh]

$C_{-q}$  = q번째 전용보일러의 열 생산단가[원/kWh]

$P_{HOB-q}$  = q번째 전용보일러의 열 생산량[kWh]

$PR_{B-k}$  = k번째 구간의 전력구입 가격[원/kWh]

$P_{B-k}$  = k번째 구간의 전력구입량[kWh]

$PR_{S-k}$  = k번째 구간의 전력판매 가격[원/kWh]

$P_{S-k}$  = k번째 구간의 전력판매량[kWh]

각 운용구간의 제약조건들은 다음과 같이 정의한다. 디젤 발전기에서의 발전량은 식 (2)와 같이 최소출력 이상, 최대출력 이하의 범위 내에서 운전하여야 한다.

$$P_{DSG-i}^{MIN} \leq P_{DSG-i} \leq P_{DSG-i}^{MAX} \quad (2)$$

여기서,

$P_{DSG-i}^{MIN}$  = i번째 디젤 발전기의 최소출력량[kWh]

$P_{DSG-i}^{MAX}$  = i번째 디젤 발전기의 최대출력량[kWh]

마찬가지로 식 (3)은 열병합 발전기에서의 발전량도 최소출력 이상, 최대출력 이하의 범위 내에서 운전하여야 한다는 것을 의미한다.

$$P_{COG-j}^{MIN} \leq P_{COG-j} \leq P_{COG-j}^{MAX} \quad (3)$$

여기서,

$P_{COG-j}^{MIN}$  = j번째 열병합 발전기의 최소출력량[kWh]

$P_{COG-j}^{MAX}$  = j번째 열병합 발전기의 최대출력량[kWh]

식 (4)는 전용 보일러의 열 생산은 전용보일러의 최소출력 이상, 최대출력 이하의 범위 내에서 가능하다는 것을 나타낸다.

$$P_{HOB-q}^{MIN} \leq P_{HOB-q} \leq P_{HOB-q}^{MAX} \quad (4)$$

여기서,

$P_{HOB-q}^{MIN}$  = q번째 전용보일러의 최소출력량[kWh]

$P_{HOB-q}^{MAX}$  = q번째 전용보일러의 최대출력량[kWh]

신재생 전원에서의 발전량, 디젤발전기 및 열병합 발전기의 발전량, 전력시장으로부터 구입한 전력량 그리고 운용구간 i에서 저장장치에서 방전 가능한 전력량의 합은 각 구간 동안 부하로 공급되는 전력량, 전력시장으로 판매한 전력량과 운용구간 i에서 저장장치로 충전 가능한 전력량과 같으며 이는 수요공급의 법칙에 따라 성립되며 제약조건 (5)와 같다.

$$P_{RDG} + \sum_{i=1}^M P_{DSG-i} + \sum_{j=1}^N P_{COG-j} + P_B + B_{disch} - P_S - B_{ch} - P_{LOAD} = 0 \quad (5)$$

여기서,

$$\begin{aligned}
 P_{RDG-k} &= k\text{번째 구간에서 신재생 전원에서의 발전량[kWh]} \\
 B_{disch-k} &= k\text{번째 구간에서 저장장치의 방전량[kWh]} \\
 B_{ch-k} &= k\text{번째 구간에서 저장장치의 충전량[kWh]} \\
 P_{LOAD-k} &= k\text{번째 구간에서 전력 수요량[kWh]}
 \end{aligned}$$

각 구간 동안 열 부하에서 필요로 하는 에너지는 열병합 발전기와 전용보일러에서 발생한 열 생산량과 같으며 이 관계는 식 (6)과 같다.

$$\sum_{j=1}^N H_{COG-j} + \sum_{q=1}^Q H_{HOB-q} = H_{LOAD-k} \quad (6)$$

여기서,  
 $H_{COG-j}$  = j번째 열병합 발전기의 열 생산량[kWh]  
 $H_{HOB-q}$  = q번째 전용보일러의 열 생산량[kWh]  
 $H_{LOAD-k}$  = k번째 구간에서 열 수요량[kWh]

각 운용구간 동안 열병합 발전기에서 발생한 출력은 식 (7),(8)에 의해서 열과 전력을 정해진 비율의 범위 내에서 생산하며, 그림 2는 열병합 발전기의 운용가능영역을 보여준다[2].

$$H_{COG-j} \leq (1/E_L) \cdot P_{COG-j} \quad (7)$$

$$H_{COG-j} \geq (1/E_H) \cdot P_{COG-j} \quad (8)$$

여기서,  
 $E_{L-j}$  = j번째 열병합 발전기에서 열과 전력의 최대 생산 비율[kWh]  
 $E_{H-j}$  = j번째 열병합 발전기에서 열과 전력의 최소 생산 비율[kWh]

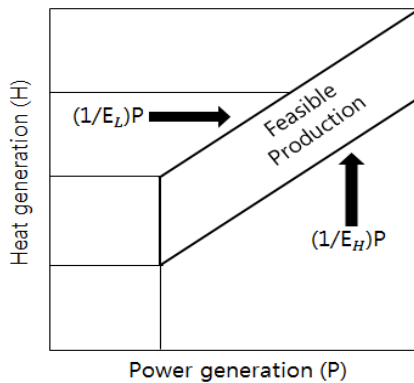


그림 2 열병합 발전기의 운용가능영역  
 Fig. 2 Cogeneration feasible operation region

저장장치의 방전량은 저장장치에 남아있는 전력량 범위 내에서 가능하며 이는 제약조건 (9)와 같이 제약된다.

$$0 \leq B_{disch} \leq B_{(i-1)} \quad (9)$$

여기서,

$$B_{(i-1)} = \text{저장장치에 남아있는 전력량[kWh]}$$

저장장치의 충전량은 저장장치용량에서 현재 충전되어 있는 전력량을 제외한 여분 범위 내에서 가능하며 이는 제약 조건 (10)과 같이 제약된다.

$$0 \leq B_{ch} \leq B^{MAX} - B_{(i-1)} \quad (10)$$

여기서,  
 $B^{MAX}$  = 저장장치의 최대용량[kWh]

저장장치의 최종 충전상태는 손실률을 고려하여 식 (11)과 같이 나타낸다.

$$B_i = B_{(i-1)} - B_{disch}/(1-L_d) + B_{ch} \cdot (1-L_c) \quad (11)$$

여기서,  
 $B_i$  = 저장장치의 최종 충전상태[kWh]  
 $L_d$  = 저장장치의 방전 손실률[kWh]  
 $L_c$  = 저장장치의 충전 손실률[kWh]

#### 4. 시뮬레이션

##### 4.1 운용 조건

최적 운용을 위한 수리적 모델의 적용 가능성을 검토하기 위하여 Lingo를 이용하여 선형계획법의 최적해를 구하였으며, 본 논문에서의 마이크로그리드 구성은 다음과 같다[11].

- 분산전원: 디젤발전기, 열병합발전기, 전용보일러
- 분산저장시스템: 전력저장장치
- 부하: 전기부하, 열부하

각 운용 구간별 데이터는 표 1, 발전기 데이터는 표 2, 저장장치 데이터는 표 3, 열병합 발전기의 열과 전력 생산비율은 표 4, 그리고 저장장치의 충·방전 손실률은 표 5에 각각 나타내었다.

표 1 입력 데이터

Table 1 Input data

interval	$P_{RDG}$ (kWh)	$P_{LOAD}$ (kWh)	$H_{LOAD}$ (kWh)	$PR_B, PR_S$ (원/kWh)
1	0	100	40	135
2	0	110	45	137
3	0	120	52	140
4	7	145	55	154
5	10	180	70	156
6	16	240	82	160
7	25	230	68	158
8	14	210	56	157
9	8	220	64	162
10	0	260	65	166
11	0	230	58	156
12	0	160	42	148

표 2 발전기 데이터

Table 2 Data of generators

발전기	DSG	COG	HOB
발전단가 (원/kWh)	153	150	140
최소출력량	0	7	3
최대출력량	100	80	40

표 3 전력저장장치 데이터

Table 3 Data of electric energy storage system

초기 용량	최소 용량	최대 용량
50	0	100

표 4 열과 전력 생산비율

Table 4 Heat and electric power ratio

발전기	$E_L$	$E_H$
Cogenerator	0.4	0.8

표 5 저장장치의 충·방전 손실률

Table 5 Charge/discharge loss factors of electric energy storage system

$L_C$	$L_D$
0.05	0.05

4.2 최적운용 결과

마이크로그리드의 최적 운용을 위하여 수립된 수리적 모델을 이용한 운용 결과는 표 6과 같다. 발전 단가가 가장 높은 디젤 발전기는 전력부하의 수요량이 높은 구간에만 운전하고 전용보일러는 최소한의 열을 생산할 정도로만 운전하는 것이 경제적이다.

표 6 결과 데이터

Table 6 Output data

interval	$P_{DSG}$ (kWh)	$P_{COG}$ (kWh)	$H_{COG}$ (kWh)	$H_{HOB}$ (kWh)
1	0	14.8	37	3
2	0	16.8	42	3
3	0	19.6	49	3
4	100	41.6	52	3
5	100	53.6	67	3
6	100	63.2	79	3
7	100	52	65	3
8	100	42.4	53	3
9	100	48.8	61	3
10	100	49.6	62	3
11	100	44	55	3
12	0	15.6	39	3

그림 3은 각 발전기에서 생산되는 전력량을 시간대별로 나타낸 것이다. 이는 디젤 발전기보다 발전 단가가 낮은 열병합 발전기가 기저부하를 담당하며, 각 발전기의 발전단가와 전력거래가격이 고려되어 전력을 생산함으로써 최적 운용이 수립되었음을 확인할 수 있다.

열전비는 열과 전기의 수요에 따른 열공급량과 발전량의 비율로 산정한다. 본 논문의 열병합 발전기에서는 식 (7), (8)에 의하여 그림 4와 같이 구간별 수요량에 따라 운용가능영역 내에서 열과 전기를 최적의 비율로 생산하며 표 7은 최적화된 최적 열전비를 나타낸 것이다.

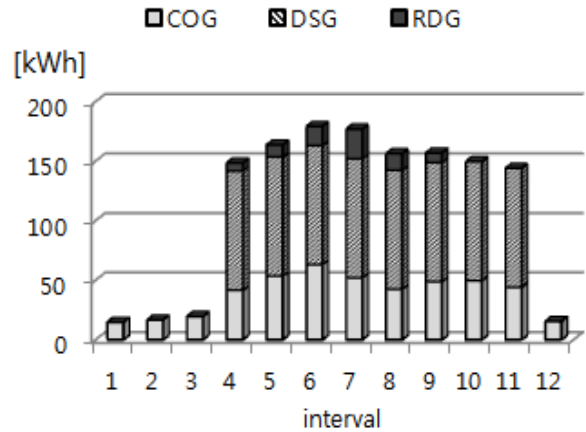


그림 3 DGs 발전량

Fig. 3 Power generation DGs

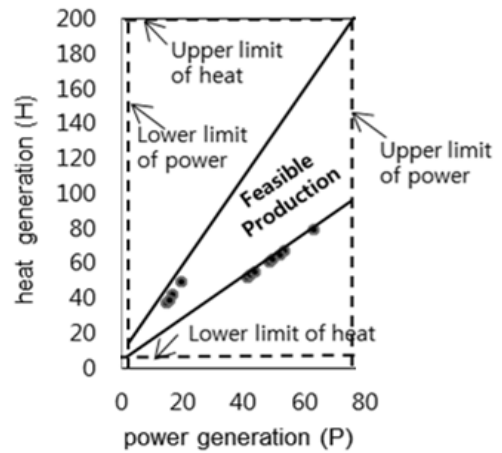


그림 4 열과 전기의 생산

Fig. 4 Heat and power operation

표 7 최적 열전비

Table 7 Optimal heat and electric power ratio

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2.5	2.5	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25	2.5

그림 5는 전력저장장치의 충·방전량을 구간별로 나타낸 것이다. 거래가격이 낮고, 경부하시간대인 1, 2, 3 구간에서 잉여 전력을 저장하였다가 거래가격이 비교적 높으면서 전력부하의 수요량이 높은 운용구간 10에서 저장되어 있던 전

력을 방전하였다. 이는 거래가격에 의하여 저장장치의 충·방전량을 조절함으로써 거래전력량에 영향을 미치는 것을 그림 6을 통하여 확인할 수 있다. 따라서 최적운용계획이 전력 거래가격과 발전단가를 고려하여 계획된다는 것을 보여준다.

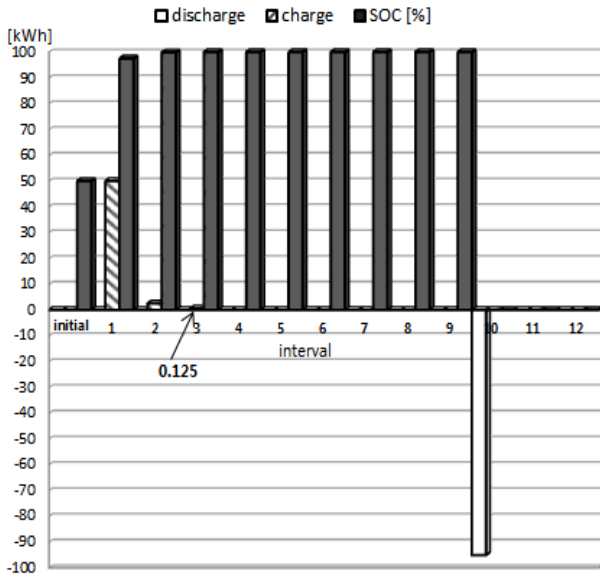


그림 5 전력저장장치의 충·방전량  
Fig. 5 Charge and discharge of electric energy storage system

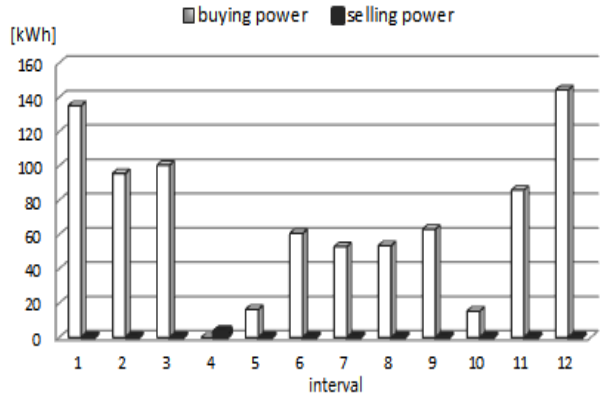


그림 6 각 구간별 최적화된 전력 거래량  
Fig. 6 Power transaction optimized in each interval

#### 4. 결 론

본 논문에서는 가변 열전비를 갖는 열병합 발전설비를 고려하였을 경우 선형계획법에 의거하여 마이크로그리드의 최적운용을 위한 수리적 모델을 정식화하였다. 사례연구를 통하여 각 운용구간별 수요량에 따라서 전력거래가격과 발전단가를 고려하였을 경우, 열과 전기를 최적으로 생산하여 시스템의 경제성 및 에너지 이용효율이 증대되는 것을 확인할 수 있었다.

추후 연구로는 시스템의 안정적인 출력을 위해서 제시한 수리적 모델에 열에너지 저장장치 또한 고려할 계획이다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H.-M. Kim, and T. Kinoshita, "A multiagens system flor microgrid operation in the grid-interconnected mode," Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 5, No. 2, pp. 246-254, 2010.
- [2] H.-M. Kim, M.-C. Shin, C.-H. Kim, and C.-Y. Won, "Optimum operation of small power producing facilities interconnected with power system," Trans. KIEE, Vol. 44, No. 4, pp. 409-417, Apr. 1995.
- [3] C. M. Colson, M. H. Nehrir, "A review of Challenges to Real-Time Power management of microgrids," Proceedings of 2009 IEEE Power & Energy Society General Meeting, pp. 1-8, Jul. 2009.
- [4] Ashoke Kumar Basu, Sunetra Chowdhury, S. P Chowdhury, "Planned scheduling for economic power sharing in a chp-based micro-grid," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 27, No. 1, pp. 30-38, Feb. 2012.
- [5] A. K. Basu, S. Chodhury, S. P. Chowdhury, "Operational Management of CHP-based microgrid," Proceedings of 2009 IEEE Power System Technology,, pp. 24-28, Oct. 2009.
- [6] R. H. Lasseter, "Microgrid," Proceeding of IEEE PES Winter Meeting, Jan. 2002.
- [7] J.-H. Jeon, "Unified compensation control of a hybrid energy storage system for enhancing stability and operation efficiency in a diesel and wind-turbine based stand-alone microgrid," Ph.D. dissertation, Pusan National University, Dec. 2011.
- [8] Chang-Soo Kim, Chang-HO Rhee, "A study on the improvement of subsidy program for CHP plant connected with capital region district heating system," Tans, KIEE Journal of Electrical Engineering & Technology, Vol. 53, No. 2, pp. 97-103, Aug. 2004.
- [9] Javad Olamaej, S. Mehdi Hasheminasab, Mahmoodreza Haghifam, "Optimal operation of microgrid with renewable and combined heat and power resources," European Journal of Scientific Research, Vol. 67, No. 4, pp. 543-550, 2012.
- [10] W. Gu, Z. Wu, and X. Yu, "Microgrid economic optimal operation of the combined heat and power system with renewable energy," Proceedings of 2010 IEEE Power and Energy Society General Meeting, pp.1-6, Jul. 2010.
- [11] Linus Schrage, Optimization modeling with lingo, LINDO systems Inc., 2006.

#### 감사의 글

이 논문은 인천대학교 2011년도 자체연구비 지원에 의하여 연구되었음.

저 자 소 개



**이 지 혜 (李 枝 漣)**

1989년 10월 7일생. 2012년 인천대학교 전기공학과 졸업. 2012년 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**박 재 세 (朴 載 世)**

1952년 1월 25일생. 1975년 숭실대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 성균관 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 인천대학교 전기공학과 교수.