

중앙난방 시스템의 최적제어 알고리즘의 적용을 위한 실험적 연구

안 병 천 , 천 원 익*

경원대학교 건축설비공학과, * 경원대학교 건축설비공학과 대학원

An experimental study on the optimal control algorithm for central heating system

Byung-Cheon Ahn Won-Ik Chun*

ABSTRACT: An experimental study on the optimal control algorithm for central heating system for minimizing energy consumption while maintaining the comfort of indoor thermal environment in terms of the environmental variables such as loads and weather. experimental study has been done by one using the prototype of central heating system. As a result the optimal control algorithm shows good energy performance in comparison with conventional control one.

Key words: Central heating system(중앙난방 시스템), DDC controller(직접 디지털 제어기), Optimal control algorithm(최적제어 알고리즘),

기 호 설 명

P_{tot}	: 총 에너지 소모량	[KW]
P_{pump}	: 온수 순환 펌프 에너지 소모량	[KW]
P_{fan}	: 급·배기 팬의 에너지 소모량	[KW]
P_{boiler}	: 보일러의 에너지 소모량	[KW]
ΔT_a	: 코일의 입·출구 공기 온도차	[°C]
ΔT_w	: 온수 코일 입·출구 온도차	[°C]
ΔT_z	: 공급공기와 존의 온도차	[°C]
K	: 특성계수	
$T_{sa, opt}$: 최적 급기온도	[°C]
$T_{sw, opt}$: 최적 급수온도	[°C]

1. 서 론

현재 대부분의 열원 및 공조시스템에서 사용하고 있는 제어 알고리즘은 변화하는 실내부하 및 환경조건에 대한 최적의 운전이 이루어지지 않음으로서 많은 전력소비 및 가스, 기름등의 낭비를 초래하고 있는 실정이다. 따라서 공조 시스템의 전체 시스템에 사용되는 에너지원을 최소화하는 제어방식의 최적화가 급선무라 할 수 있겠다.

따라서 본 논문에서는 실내의 난방부하, 설정온도, 등에 따라서 공급공기온도를 제어하고 동시에 온수공급온도를 제어함으로써 난방에 사용되는 전체 에너지를 최소화 할 수 있는 제어 방법을 개발하는 것에 목적이 있다고 하겠다. 이러한 제어기법은 종래의 미리 정해놓은 설정점들과 운전자의 경험에 의존한 운전이 따른 외기온도 즉, 부하변화에 대처하지 못하여 발생하는 과도한 에너지 소비를 막을 수 있을 것이다. 또한 현재의 난방 시스템에서 프로그램의 구성을 통하여 제안된 알고

* Corresponding author

Tel.: +82-31-750-5314; fax: +82-31-750-5314

E-mail address: wonik3@naver.com

리즘을 적용 가능하리라고 판단된다.

설정치들과 관계되는 제어변수들의 운전점이 구성요소 및 전체시스템의 에너지 소모량에 많은 영향을 줄 수 있고 환경변화에 따라 적절한 공기조화 시스템의 운전 조건을 결정함으로써 에너지소비를 최소화하고자 하는 연구가 많이 이루어지고 있다. Boyens 등⁽¹⁾ 중앙냉방시스템의 최적화를 위해 Braun 등⁽²⁾이 개발한 최적제어개념을 급기 팬과 가스 난방로로 구성되어 있는 단순한 난방시스템에 적용한 실험을 수행하였다. 최적화 단계로 우선 급기 팬과 가스 난방로의 최적제어를 각각 적용하여 에너지 절감효과를 관찰하였고 두 가지 제어를 혼합하여 사용하는 방법을 고안하여 최적의 운전 방법을 제시하였다. 그러나 최적 설정치를 구하기 위해서는 환경 및 제어변수의 변화에 대한 에너지 소모량을 표현하는 2차함수의 계수를 실험 또는 통계적인 처리방법을 통해 구해야 하기 때문에 실시간 제어에 적용하기가 어렵다.

이전의 Ahn⁽⁵⁾의 연구에서 난방시스템에서 최적 제어 알고리즘을 적용한 시뮬레이션의 결과 최소 8%에서 최대 12%의 에너지 절감 효과를 관찰할 수 있었다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 중앙난방 시스템에서 실시간으로 변화하는 부하 변동에 따라 실내 상태를 최적의 상태로 유지할 수 있는 최적제어 알고리즘을 적용하여 실험 장치를 구성하고 실제 실험을 통하여 최적제어 알고리즘의 실제 구현 및 적용을 보여주고자 한다.

2. 최적제어 알고리즘⁽⁵⁾

본 연구에서 사용된 온라인 최적제어 알고리즘에 대해 간단히 기술하면 다음과 같다. 먼저 보일러, 온수 펌프 및 급기 팬 등에서 소모되는 에너지를 총에너지 소모량으로 고려하였다. 따라서 총에너지 소모량을 수식으로 나타내면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{Tot} = P_{Boiler} + P_{Pump} + P_{fan} \quad (1)$$

보일러의 효율과 난방코일에서의 열교환 관계로부터 보일러의 공급되는 에너지는 다음과 같다.

$$P_{Boiler} = K_{Boiler} \cdot \Delta T_a \quad (2)$$

또한, 온수의 순환계통에서의 온수순환펌프동력을 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{Pump} = K_{Pump} \cdot \Delta T_a^3 \quad (3)$$

난방부하를 고려한 팬의 동력소모량을 급기와 실내의 온도차를 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$P_{Fan} = K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z} \quad (4)$$

공조시스템의 총에너지 소모량은 다음과 같이 난방코일의 입출구 공기온도차와 실내에 공급되는 공기와 실내의 온도차(이하 급기온도차라 함)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{Tot}(\Delta T_a, \Delta T_z) &= K_{Boiler} \cdot \Delta T_a + K_{Pump} \cdot \Delta T_a^3 \\ &+ K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z} \end{aligned} \quad (5)$$

배기와 환기되는 공기사이의 열교환 특성관계로부터 난방코일의 입출구 공기온도차와 급기온도차의 관계를 구하여 총에너지 소모량을 급기온도차로 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{Tot}(\Delta T_z) &= K_{Boiler} \cdot \Delta T_z + K_{Pump} \cdot \Delta T_z^3 \\ &+ K_{Fan} \cdot \frac{1}{\Delta T_z^3} \end{aligned} \quad (6)$$

이 식을 미분하고 Newton-Raphson 방법으로 근을 구하면 총에너지 소모량이 최소가 되는 최적의 급기온도차를 얻을 수 있으며 이는 K_{Boiler} , K_{Pump} , K_{Fan} 등과 같은 특성상수들로부터 결정되어 진다. 난방코일 출구의 공기온도의 최적 설정치는 다음 식을 통해 구할 수 있다.

$$T_{su,opt} = \Delta T_{z,opt} + T_z \quad (7)$$

난방코일에서의 공기와 온수와의 열교환을 통해 보일러로부터 공급되는 온수의 최적 설정치를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_{su,opt} &= \Delta T_{w,opt} + T_{rw} \\ C_w \cdot \dot{m}_w \cdot \Delta T_{w,opt} &= C_a \cdot \dot{m}_a \cdot \Delta T_{a,opt} \end{aligned} \quad (8)$$

또한 난방부하에 의해 존에 공급되어야 하는 급

기공기의 흐름량은 다음과 같다.

$$\dot{m}_{a,opt} = \frac{Q_L}{C_a} \cdot \frac{1}{\Delta T_{z,opt}} \quad (9)$$

3. 실험 장치 및 방법

3.1 실험 장치 및 제어장치

본 연구에서는 실제 중앙난방 시스템을 구성하여 최적제어 알고리즘을 적용하여 실험을 통하여 구성기기들의 동작특성 및 에너지 변화특성을 관찰하기 위한 연구이다.

먼저 사진 1은 실제 최적제어 알고리즘 적용하여 실험하기 위한 중앙제어 난방시스템의 상세 사진이다. 중앙에 위치한 모니터링 시스템을 이용하여 시스템 제어 및 상태의 모니터링이 가능하다.

사진 2는 실험실내에 위치한 기계실 상세사진이다. 대표적인 장치를 설명하면 먼저 ①번은 이번 실험에 사용된 (주)센추리의 최대풍량 20CMM의 난방능력 10000Kcal/h의 AHU(공조기)의 상세사진이다. ②번은 (주)경동보일러의 모델번호(KDB-96SA)의 난방출력 15000Kcal/h의 일반적인 가정용 온수 보일러이다. ③번은 센추리의 모델번호(SF-2SS) 송풍기로서 표준 풍량 20CMM 최대정압 15MMAq 이고 실내로의 급기 송풍기와 실내에서 외부로 배기 되는 송풍기이다. ④번은 실내로 공급되는 공기온도 조절을 위하여 온수코일로 공급되는 온수량을 조절하여 주는 3-Way 밸브이다.

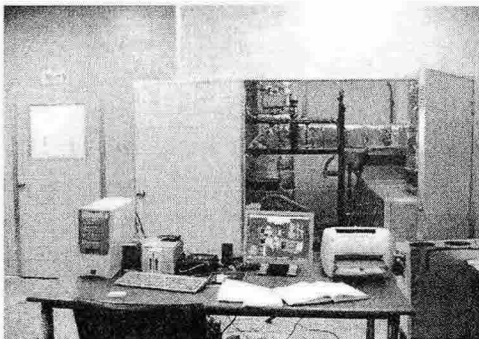


Photo 1 Control & monitoring apparatus for central heating system.

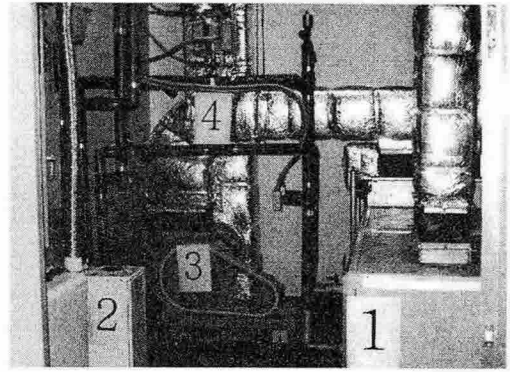


Photo 2 Experimental apparatus central heating system.

사진 3은 실제 제어기와 인버터의 상세 사진이다. 먼저 ①번은 Alerton社의 VLC-1188C3 DD C 제어기이고의 사진이다. ②번은 LG 산전의 Sta Invert-Ig5 인버터의 사진이다

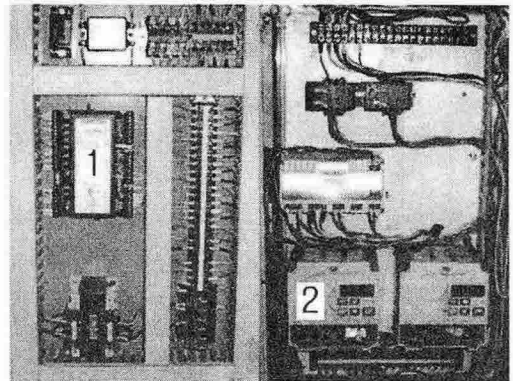


Photo 3 Automatic controller for central heating system.

3.2 제어용 프로그램

본 연구에서는 중앙난방 시스템에서 총 에너지 소비 절감을 위한 최적제어 알고리즘을 앞에서 제시하였고 제안된 알고리즘을 이용하여 중앙난방 시스템에 적용하기 위해서는 최적제어 알고리즘의 프로그램화가 이루어 져야 한다. 따라서 본 연구에서는 그래픽 프로그램 언어인 MS Visual Logic 을 이용하여 제어 알고리즘 프로그램을 구성하였

고 BACtalk for Windows S/W를 이용하여 실제 실험 장치들의 모습과 상태를 컴퓨터의 Windows 화면상에 디스플레이 할 수 있게 하였다.

먼저 BACtalk for Windows S/W에서는 실제 실험 장치들의 운전 상태를 중앙 제어용 컴퓨터의 윈도우 화면상에 디스플레이 해주는 프로그램이다. 변화하는 실의 온도 급기온도 전력량 풍량 등 여러 가지 측정요소들이 센서를 통하여 측정되고 이 측정된 데이터 값들은 DDC 모듈을 통해서 실시간으로 컴퓨터 윈도우 화면에 디스플레이 해주고 있다. 이러한 시스템 구성으로 인하여 실시간으로 변화하는 데이터 값들을 모니터링 할 수 있고 실험 중에 발생 할 수 있는 이상 동작도 실시간으로 감지가 가능하다.

Fig. 1은 BACtalk for Windows S/W에서 공조기(AHU)의 운전모습을 나타낸 화면이다. 공조기의 운전상태와 급기, 환기, 혼합온도와 급배기 팬 속도, 최소 댐퍼 개도의 설정, 정압크기의 설정 급배기 전력 소모량 등을 나타내주고 있다. 제안된 최적제어 알고리즘이 프로그램 내에서 타당한 값을 나타내는지 실시간으로 감시 할 수 있고 또한 계산식에 의해서 올바른 근의 값이 나오는지 여부를 알기위해 근의 값도 나타내 주었다.

Fig. 2는 실험을 진행하기 위하여 구성요소 들의 상관관계를 나타내고 있다. 공기의 급기온도, 공급되는 온수온도, 실내 온도 등이 센서에 의해 측정되어지고 팬의 동력, 펌프의 동력, 보일러의 에너지 소모량이 최적제어 프로그램에 입력되어지면 최적제어 알고리즘을 통하여 최적의 설정치를 계산하여 각 구성요소에 출력할 제어신호의 크기를 결정하여 BACtalk 장치를 이용하여 DDC제어

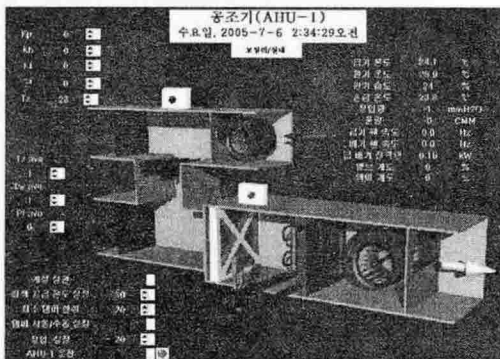


Fig. 1 Supervisory monitoring system for AHU

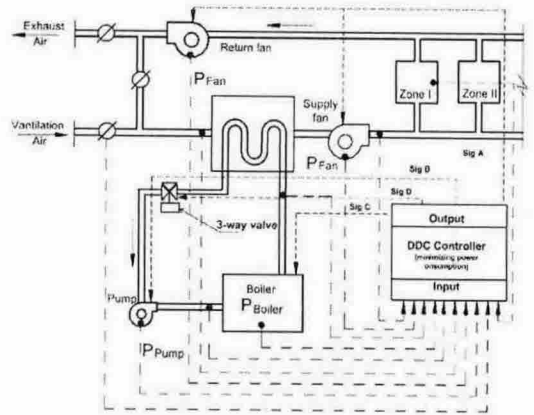


Fig. 2 Schematic diagram input/output of the DDC controller

기로 전송, 각 기기들을 설정치의 값으로 운전하게 된다. 이러한 과정을 실시간으로 반복하여 부하변동에 대처하면서 실내의 온도를 일정하게 유지할 수 있도록 해준다.

3.3 실험방법

본 연구에서는 총 에너지 소비를 최소화 할 수 있는 최적제어 알고리즘이 적용된 중앙난방 시스템의 실제 모형실험 장치를 구성하여 동계 난방기간 동안에 실험을 통하여 알고리즘의 적용 가능여부와 타당성을 검증하는 것이 목적이다. 최적제어 알고리즘을 이용하여 실외의 환경변화에 따라 급기온도와 온수공급온도의 최적 설정값을 실시간으로 계산하며, 온수코일의 온수라인에 설치된 3-Way 밸브를 이용하여 급기온도가 최적설정값에 유지될 수 있도록 제어가 이루어진다. 또한 보일러는 On-Off 제어를 통해서 계산된 온수공급온도가 최적 설정값을 유지하도록 피드백 제어가 이루어지도록 하였다.

또한, 룸A와 룸B에 공급되는 공기의 풍량을 적절히 유지하기 위하여 인버터를 이용한 급기의 정압제어가 이루어지고 룸A와 룸B의 실내공기온도는 급기댐퍼의 개도제어를 통해 이루어지도록 하였다. 이러한 시스템을 통하여 외기부하 변화에 따른 급기온도와 보일러의 공급온수온도의 설정값들의 변화에 대해 실내공기온도의 응답특성 및 에너지 소비량의 변화특성, 풍량의 변화특성 등을 비교 고찰 하였다.

4. 실험 결과 및 고찰

중앙난방 시스템에서 최적제어 알고리즘의 적용 실험의 결과는 다음과 같다.

먼저 Fig 3은 시간에 따라 변화하는 난방부하의 변화에 따라 최적제어 알고리즘이 적절히 이루어지고 있는지를 확인하기 위한 결과이다. 시간에 따라 변화되는 외기 온도특성에 따라 급기 온도의 변화를 나타내 주고 있다. 그림에서 보듯이 외기의 온도가 떨어질수록 급기온도의 설정은 반대로 높은 값을 나타내고 외기온도가 올라가면 급기온도의 설정값도 내려가는 모습을 볼 수 있다.

이는 부하가 변화함에 따라 급기온도의 설정값들은 변화하게 되고 이에 대응하여 실내로 공급되는 급기온도도 적절한 값으로 변화됨을 나타내어 주고 있다. 또한, 변화하는 급기온도에 따라서 실내온도가 일정하게 유지되는 모습을 보여주고 있다. 최적제어 알고리즘의 구성과 실험이 목표이지만 실내온도를 목표치로 유지 시켜 주지 못한다면 이 실험은 의미가 없는 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 외기 온도가 변화함에도 불구하고 실내온도가 목표치인 22°C를 유지하는 이유는 적절한 급기온도 조절로 인하여 변화하는 부하에 대응하며 실내온도가 유지됨을 알 수 있다. 이는 곧 최적제어 알고리즘이 타당한 결과를 나타내주고

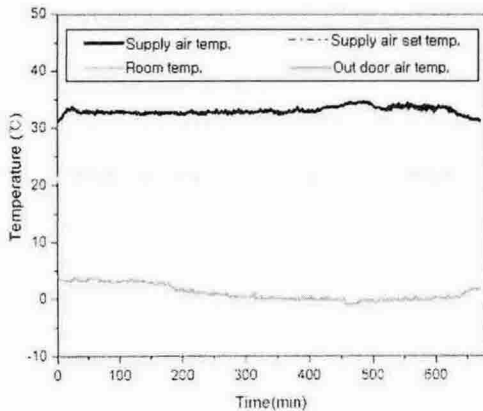


Fig. 3 Supply air temperature and air set point temperature variation for time-varying outdoor temperature.

있다고 보는 것이다.

Fig. 4는 시간에 따른 난방부하의 변화에 따라

보일러 온수온도의 변화를 나타낸 것이다. 급기온도와 마찬가지로 외기온도가 떨어질 경우는 온수온도가 상승하며, 외기온도가 상승할 경우 온수온도는 오히려 떨어지는 경향을 나타냄을 알 수 있다. 이것은 외기의 변화에 따라 보일러온수온도의 값이 적절히 변화됨을 나타내고 있는 것으로서 급기온도의 변화에 비해 보일러 온수온도의 변화가 외기온도변화에 더욱 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 또한 실제 보일러 온수온도는 최적 설정치를 잘 추종하고 있음을 알 수 있다.

Fig. 5는 외기온도의 변화에 따른 보일러 및 급기팬, 그리고 전체 시스템의 에너지 소모량 특성을 나타낸 그림이다. 그림에서 볼 수 있듯이 외기온도가 감소함에 따라 에너지 소모량은 증가하고 있음을 알 수 있으며, 전체에너지 소모량의 변화특성은 보일러의 에너지 변화특성과 유사한 경향을 알 수 있는데 이것은 급기팬의 전력량이 상대적으로 적게 변화하기 때문이다. 또한 팬 전력량은 완만한 변화특성을 나타내어주고 있는 반면에 보일러의 에너지 소비량의 변화는 커다란 변화특성을 나타내고 있는데 이것은 제어알고리즘의 구성에서 알 수 있듯이 급기온도 설정치를 계산하고 공기와 온수의 열교환을 고려하여 최적의 온수온도의 설정치를 계산함으로써 급기풍량의 변화특성이 보일러 온수온도의 설정값 계산에 영향을 주기 때문에 나타나는 현상이다.

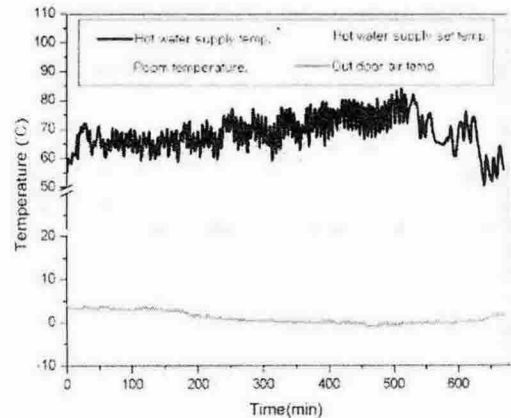


Fig. 4 Hot water supply temperature variation for time-varying outdoor temperature.

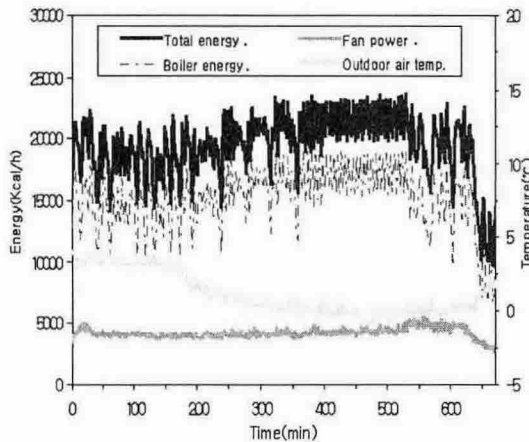


Fig. 5 Energy variation for time-varying outdoor temperatures.

5. 결론

이번 실험을 통하여 시스템 제어변수에 따른 시스템 응답특성 및 에너지 소비량특성을 비교 고찰 하였으며 이러한 연구결과로 다음과 같은 결론을 얻게 되었다

1) 총 에너지의 소비량은 외기온도가 낮아질수록, 부하가 커질수록 선형적으로 증가하게 된다. 이러한 선형적인 증가는 상대적으로 외기온도 또는 부하에 직접적으로 영향을 받는 보일러의 에너지 변화율에 총 에너지가 더욱 많은 영향을 받는다는 것으로 나타낸다. 이를 통해 보일러의 온수 온도 제어가 총에너지의 감소에 커다란 영향을 미친다는 것을 알 수 있었다.

2) 실험을 통한 연구 결과로서 외기온도가 변화됨에 따라 공급 온수 온도의 설정치는 55~78°C로 변화하였다 급기온도 설정은 30~35°C 에 비하여 상대적으로 큰 값이 변화되었음을 알 수 있다. 이는 실내로 공급되는 급기온도를 급격히 변화시키는 것보다 급기온도를 완만하게 변화시키면서 온

수온도 설정치의 변화로 부하를 추종하여 나가는 것이 에너지 절약에 있어 효율적이라는 것을 보여주고 있다.

3) 실험적 연구 결과로서 동일한 외기 운전 조건에서 팬과 보일러의 에너지의 소모량의 크기가 종래의 난방방식과 비교하여 평균 8% 감소되었고 부하가 큰 경우 최대 11% 까지 에너지 절약이 가능함을 알 수 있다.

참고문헌

1. A. Boyens., "Experimental validation of a methodology for determining heating system control strategies", ASHRAE Transaction, pp24~30, 1990.
2. Braun, J.E., Klein, S.A., Mitchell, J.W., Beckman, W.A. "Methodology for optimal control to chilled water systems without storage", ASHRAE Transaction, Vol.95, pp652~662, 1989.
3. Zaheer-Uddin, M., Zheng, G.R., "Multistage optimal operating strategies for HVAC systems", ASHRAE Transaction, Vol.107, PART 2, pp346~352, 2001.
4. Kaya, A., Enterline, L.L and Sommer, A. C., "Chiller optimization by distributed control to save energy, Proceedings of the Instrument Society of America Conference, Houston, TX. 1983.
5. Ahn, B. C. "Optimal Control Method for reducing Energy Consumption in Central Heating System", SAREK pp.789-794, 2004.
6. Klein, S.A., et al, TRNSYS : a Transient System Simulation Program, University of Wisconsin-Madison.