기상 예보 데이터와 일사 예측 모델식을 활용한 실시간 에너지 수요예측

Real-time Energy Demand Prediction Method Using Weather Forecasting Data and Solar Model

곽영훈(Young-Hoon Kwak)^{1*}, 천세환(Se-Hwan Cheon)¹, 장철용(Cheol-Yong Jang)²,
허정호(Jung-Ho Huh)¹

¹서울시립대학교 건축공학과, ²한국에너지기술연구원 녹색건축센터

¹Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Republic of Korea

²Green Building Research Center, Korea Institute of Energy Research, Daejeon 305-343, Republic of Korea

(Received December 18, 2012; revision received March 27, 2013)

Abstract This study was designed to investigate a method for short-term, real-time energy demand prediction, to cope with changing loads for the effective operation and management of buildings. Through a case study, a novel methodology for real-time energy demand prediction with the use of weather forecasting data was suggested. To perform the input and output operations of weather data, and to calculate solar radiation and EnergyPlus, the BCVTB (Building Control Virtual Test Bed) was designed. Through the BCVTB, energy demand prediction for the next 24 hours was carried out, based on 4 real-time weather data and 2 solar radiation calculations. The weather parameters used in a model equation to calculate solar radiation were sourced from the weather data of the KMA (Korea Meteorological Administration). Depending on the local weather forecast data, the results showed their corresponding predicted values. Thus, this methodology was successfully applicable to anywhere that local weather forecast data is available.

Key words Real-time Energy Demand Prediction(실시간 에너지 수요예측), Weather Forecasting Data(기상 예보 데이터), Solar Model(일사 모델), BCVTB, EnergyPlus(에너지플러스)

* Corresponding author, E-mail: ikyh2@uos.ac.kr

기호설명

I	: 전일사량, [W/m^2]
h	: 태양 고도각 [deg]
CC	: 0-1사이 값을 갖는 운량
T_n	: 현재 시각의 건구온도 [$^{\circ}\text{C}$]
T_{n-3}	: 3시간 전의 건구온도 [$^{\circ}\text{C}$]
V_w	: 풍속 [m/s]
$c_0, c_1, c_2, c_3, c_4, c_5, d$	: 회귀계수 값
K_T	: 청공 청명도
K_{TC}	: K_T 의 경계점

그리스 문자

φ	: 상대습도 [%]
-----------	------------

하첨자

g	: 전일사량
o	: 태양상수, 1367
b	: 직달일사
d	: 확산일사

1. 서 론

최근, 전 세계적으로 온실가스 저감을 목적으로 하는 친환경 건축 및 에너지 절약형 건물이 각광을 받고 있다. 이와 더불어 도시나 국가차원에서 효율적인 에너지 관리 및 효율적인 운영과 변화하는 건물 부하에 대응하기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다. 건물 부문의 에너지 절약과 효율적인 운영을 위해서는 최우선

Fig. 1 Architecture of the BCVTB with the EnergyPlus.

적으로 건물에서 사용될 에너지를 예측하고, 그에 해당하는 에너지를 공급 하는 것이라고 할 수 있다. 즉, 건물의 에너지 수요 예측을 통해 적절한 에너지 수급 계획을 수립하는 것이 매우 중요하다.

에너지 수요예측의 개발은 향후 경제적·환경적·기술적으로 완성된 스마트 빌딩을 구축하기 위한 기본 기술이라고 할 수 있다. 그리고 본 연구를 기초로 하여 스마트 빌딩을 구성하는 요소들을 가상 구현하여 실제 건물에 적용 시킬 수 있는 연구가 진행될 수 있다.⁽¹⁾ 이에 본 연구에서는 효과적인 에너지 수요 예측을 위하여 실시간으로 구동될 수 있는 하루 동안의 부하에 대한 에너지 수요예측의 사례 연구를 진행하였다.

본 연구에서는 에너지 시뮬레이션을 활용한 실시간 에너지 수요예측 방법을 실제 건물에 테스트 해보고, 국내 대표 도시에 적용하여 가능성을 평가하고자 한다.

2. 예비적 고찰

2.1 에너지 수요예측

국내외 에너지 수요예측에 대한 연구는 여러 방법으로 다양하게 연구되고 있다. 에너지 수요예측 방법으로는 크게 통계분석, 에너지 시뮬레이션 프로그램, 지능형 컴퓨터 시스템⁽²⁾ 등으로 나누어 볼 수 있고, 각각의 다양한 해석도구들이 있다. 그러나 여러 방법에는 각각의 요구조건들이 있다. 통계분석 방법의 경우, 다량의 데이터가 필요하며, 통계방법에 대한 이해가 요구된다. 이해가 부족한 경우에는 다루기도 쉽지 않다. 또한, 에너지 시뮬레이션 프로그램의 방법에는 건물 모델링이 필수적으로 요구되며, 시뮬레이션에서 이용하는 기상 데이터는 과거 평균 데이터를 활용하므로 특이한 경우에는 오차가 크게 발생할 수도 있다. 마지막으로, 지능형 컴퓨터 시스템의 방법은 예측율이 높은 반면, 활용하는 데이터가 많아야 좋은 수요예측의 결과를 기대할 수 있으며, 알고리즘을 이해하는 것도 쉽지 않다.

본 연구에서는 에너지 시뮬레이션 프로그램 방법을 이용하였다. 기상 데이터는 웹에서 실시간으로 예보

되는 기상 데이터를 활용하여 기존 연구의 큰 단점을 보완할 수 있도록 하였다.⁽¹⁾

2.2 External Interface Class

EnergyPlus에서는 ExternalInterface:Schedule, ExternalInterface:Actuator and ExternalInterface:Variable의 Object를 포함한 External Interface Class가 있다. 이 Class를 활용하면 BCVTB와 연계하여 신호를 주고 받을 수 있다. ExternalInterface:Actuator는 EMS(Energy Management System) Class에서의 EnergyManagementSystem:Actuator⁽³⁾의 쓰임과 동일하다. Fig. 1은 EnergyPlus의 External Interface Class와 BCVTB를 연결하는 구조를 나타내고 있다.⁽⁴⁾

위와 같이 BCVTB와 EnergyPlus가 연결되면, 외부 신호인 기상청에서 예보 되는 기상 데이터를 EnergyPlus의 기상 데이터로 업데이트 할 수 있다. EnergyPlus에서 입력받을 수 있는 기상 요소는 외기 건구온도(outdoor drybulb), 외기 이슬점온도(outdoor dewpoint), 외기 상대습도(outdoor relative humidity), 확산일사(diffuse solar), 직달일사(direct solar), 풍속(wind speed), 풍향(wind direction) 등 총 7가지⁽³⁾가 있으며, 본 연구에서는 그 중에서 외기 이슬점온도를 제외한 6가지의 기상 요소를 활용한다. 기상청의 예보 데이터에서 온도, 습도, 풍향, 풍속, 운량 등의 데이터를 받아 시간별 기상을 계산한다. 여기서, 운량은 전일사량을 계산하기 위한 기상 요소이다. 이상의 기상요소로 전일사량을 예측하였고, 직달일사와 확산일사를 분리하였다. 운량을 제외한 6가지의 시간별 기상요소 데이터는 BCVTB를 통하여 EnergyPlus로 입력되고, 기존의 IWEC(International Weather for Energy Calculations)인 기상 데이터 파일을 실시간 예보 데이터로 업데이트 하여 시뮬레이션 된다.

2.3 BCVTB(Building Control Virtual Test Bed)

본 연구에서 활용한 BCVTB^(주1)는 서로 다른 프로그램의 시스템 설계와 분석을 위하여 모듈화된 소프트웨어

주1) <https://simulationresearch.lbl.gov/bcvtb>.

Fig. 2 Schematic diagram BCVTB application.

어 환경이며, 미들웨어^{주2)}의 실행을 위하여 Ptolemy II^{주3)}를 이용하였다. Ptolemy II는 java 기반의 소프트웨어 프레임워크로 LBNL(Lawrence Berkeley National Laboratory)에서 이종(heterogeneous)의 시뮬레이션과 설계를 위하여 개발되었다.

Wetter et al.⁶⁾은 BCVTB를 활용하여 서로 독립적인 다른 프로그램 즉, EnergyPlus, MATLAB/Simulink, Modelica, BACnet 등에서 변수의 연계가 가능하도록 구성할 수 있다고 하였다. 일례로 EnergyPlus에서는 자연 환기를 포함한 건물에 대하여 시뮬레이션을 수행하였고, MATLAB/Simulink에서는 창 opening 위치를 결정짓는 컨트롤러를 시뮬레이션 할 수 있는 연구를 하였다. 또한, Pang et al.⁶⁾은 BCVTB에서 BACnet의 actor로 관련 정보를 입력받고, EnergyPlus와 연동하는 연구를 수행하였고, Nouidui et al.⁷⁾은 A/D USB-based converter와 연동하는 연구를 수행하였다.

이와 같이 이종의 프로그램을 연계하기 위하여 BCVTB가 활용되며, 본 연구에서는 웹 기반의 기상 예보 데이터와 EnergyPlus를 연결하기 위하여 미들웨어인 BCVTB를 설계하였다. 그에 따른 연구 개략도는 Fig. 2와 같다.

주2) 분산 컴퓨팅 환경에서 서로 다른 기종의 하드웨어 나 프로토콜, 통신환경 등을 연결하여, 응용프로그램과 그 프로그램이 운영되는 환경 간에 원만한 통신이 이루어질 수 있게 하는 소프트웨어.

주3) <http://ptolemy.eecs.berkeley.edu/ptolemyII/index.htm>.

3. 지역별 기상 예보 데이터와 일사 예측 모델

3.1 지역별 기상 예보 데이터

기상청에서는 실시간으로 Fig. 3(a)^{주4)}과 같이 3시간 간격의 온도, 습도, 풍향, 풍속, 운량 등의 기상 데이터를 예보하고 있다. 또한, Fig. 3(b)^{주5)}는 웹상에서 기상 예보가 XML 언어로 표현되어 제공되고 있으며, 이 XML을 읽어 들이는 것으로 BCVTB가 구동된다. 기상청의 동네예보를 활용하는 것은 국내 어느 지역에서도 활용될 수 있다는 장점이 있다.

그러나 기상청에서는 시뮬레이션을 수행하는데 중요한 기상 요소 중 하나인 일사 데이터는 예보하고 있지 않고 있다. 따라서 일사 데이터는 예측 모델을 이용하였고, 모델에서 사용하는 기상변수는 기상청에서 예보되는 기상 데이터를 이용하여 계산하였다.

3.2 일사 예측 모델

에너지 시뮬레이션을 수행하기 위해서는 일사량 데이터의 입력이 요구되며, 전일사량 뿐만 아니라 직달 일사량과 확산일사량이 요구된다. 본 연구에서는 기상 예보 데이터를 이용하여 전일사량을 예측한 후 계산된 결과를 바탕으로 직산분리 모델을 통하여 직달일사와 확산일사를 계산하였다.

3.2.1 수평면전일사량 예측 모델

본 연구에서는 Seo⁸⁾의 모델식(1)을 활용하였다. 이 모델은 기존의 일사 모델을 비교 분석하여 특정 모델식을 보완한 모델식이며, 회귀계수의 변경에 따라 대한민국 주요 도시를 포함한 전 세계적인 일사를 계산할 수 있는 일사 모델이다.

$$I_g = I_o \cdot \sin(h) \cdot \left\{ \begin{aligned} &c_0 + c_1(CC) + c_2(CC)^2 + d \\ &+ c_3\left(\frac{T_n - T_{n-3}}{T_w}\right) \\ &+ c_4(\varphi) + c_5\left(\frac{V_w}{V_n}\right) \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

한편, 본 연구에서는 대한민국 표준기상 데이터 개발을 위하여 검증된 전일사량 예측 모델을 이용하여 국내에서 대표가 되는 5대 도시에 대하여 일사량 예측 모델을 적용해 보았다. 이때 사용한 회귀 계수는 Table 1과 같다. 지역별 수정된 회귀 계수를 사용했을 때 95% 이상의 높은 예측율을 나타냈다.⁹⁾

주4) <http://www.kma.go.kr/weather/forecast/timeseries.jsp>.

주5) <http://www.kma.go.kr/wid/queryDFS.jsp?gridx=67&gridy=101>.

Fig. 3 Real-time weather forecasting.

Table 1 Site-specific regression coefficients

	Seoul	Daejeon	Daegu	Busan	Gwangju
c_0	0.6144	0.6450	0.5445	0.7002	0.7016
c_1	-0.0225	0.1070	0.0670	0.1920	0.1190
c_2	-0.3088	-0.4313	-0.3916	-0.5745	-0.4518
c_3	0.0333	0.0245	0.0248	0.0223	0.0163
c_4	-0.0024	-0.0020	-0.0015	-0.0021	-0.0020
c_5	0.0122	0.0047	0.0167	0.0033	-0.0048
d	-6.9008	-5.4206	-4.2085	-7.5030	-2.2362

3.2.2 직산분리 모델

Seo⁽⁸⁾의 연구에 따르면, 직산분리 모델 이용 시, Watanabe 모델을 이용하였을 때 잘 분리되어 예측된다는 결과를 도출하였다. 따라서 본 연구에서도 직산분리 모델은 Watanabe et al.⁽¹⁰⁾ 모델식을 활용하였으며, 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned}
 I_b &= I_o \sin(h) K_{DS} (1 - K_T) / (1 - K_{DS}) \\
 I_d &= I_o \sin(h) (K_T - K_{DS}) / (1 - K_{DS}) \\
 K_T &= I_g / I_o \sin(h),
 \end{aligned} \quad (2)$$

$$K_{TC} = 0.4268 + 0.1934 \sin(h),$$

$$(K_T \geq K_{TC})$$

$$K_{DS} = K_T - \left(\frac{1.107 + 0.03569 \cdot \sin(h)}{1 + 1.681 \cdot \sin^2(h)} \right) (1 - K_T)^3$$

$$(K_T < K_{TC})$$

$$K_{DS} = (3.996 - 3.862 \sin(h) + 1.54 \sin^2(h)) K_T^3$$

기존의 IWEC 기상 데이터 파일을 사용하는 것보다는 계산된 일사가 실시간으로 변동하는 기상 조건에 부합하는 일사량이라고 판단하였다. 따라서 계산된 직달일사와 확산일사를 시뮬레이션의 기상 파일 데이터에 업데이트 하였다.

4. 시뮬레이션 사례연구

4.1 BCVTB 설계

본 연구에서 제안하는 에너지 수요예측 방법은 Energy Plus가 실시간 기상 데이터를 입력받도록 설계된 BCVTB에 의해 구동된다. EnergyPlus 입력파일(.idf)과, Energy Plus와 BCVTB의 데이터 통신을 위한 변수 설정 파일(.cfg), BCVTB를 위한 Ptolemy II 파일(.xml) 등 3개의

Fig. 4 Connection of weather file with EnergyPlus(xml).

파일이 모두 완성될 때 BCVTB와 EnergyPlus가 연계된다. 그리고 BCVTB에서 기상예측 데이터를 파일로 입력받아 EnergyPlus에서 수요예측을 수행할 수 있도록 구성하였다. 이에 대한 자세한 내용은 Kwak et al.⁽¹¹⁾의 연구에 설명되어 있다. Fig. 4는 EnergyPlus에서 기상파일을 입력받도록 연계한 BCVTB의 예시를 나타내고 있다.

4.2 대상건물의 개요

본 연구에서는 검토를 위한 대상건물로 K연구소의 G빌딩을 선정하였다. 특징으로는 남측면에 이중외피가 설치되어 있으며, 지하에는 축열조가 있다. Fig. 5는 대상건물의 북서측, 남서측 외부전경이다.

실제 건물에서 사용하는 에너지를 분석하기 위하여 에너지 조사(audit)를 실시하였다. 실내 내부 부하의 밀도와 스케줄은 HVAC 시스템의 부하 프로파일에 커다

란 영향을 미치므로 시뮬레이션의 보정작업을 실시하였다.

한편, 대상건물에서는 중앙 열원방식이며, 4대의 VAV 공조기가 있다. 냉방 시스템은 2대의 스크류 냉동기와 축열조가 함께 주간 냉방부하를 담당한다. 난방시스템은 급탕과 난방을 위한 증기 보일러 2대로 운영된다. 공조기의 난방코일과 컨벡터에서 사용된다. 대상건물에 대한 자세한 내용은 Kwak et al.⁽¹¹⁾의 연구에 설명되어 있다.

4.3 실제 건물에 적용

본 연구에서 제안하는 실시간 에너지 수요예측 방법을 대상건물에 적용하였다. 적용된 기상은 온도, 습도, 풍향, 풍속, 직달일사, 확산일사의 데이터가 업데이트된 후에 나머지 기상 데이터는 IWEK 기상 데이터를 사용하여 시뮬레이션이 진행된다. 입력된 일사는 앞에서 언급한 일사 예측 모델을 이용하였다. 대상 건물은 대전에 위치하고 있으므로, 대전에 해당하는 회귀계수를 이용하여 일사를 예측하여 적용시켰다.

Fig. 6은 하절기 냉방 시스템이 가동되는 평일(2012. 07. 26)에 촬영한 실제 사진이다. 중앙부에는 실제 계측된 에너지 사용량과 모델링 예측 사용량을 나타내는 그래프를, 우측에는 하루 동안의 에너지 사용량, 신재생 에너지 발전량(태양광), 탄소 발생량을, 하단부에는 날씨 정보를 각각 나타냈다. 중앙부의 그래프에서 실제 계측 사용량은 아래쪽(파란색)이며, 모델링 예측 사용량은 위쪽(노란색)이다. 그래프에서의 점 하나는 15분을 나타내고 있으며, 계측 사용량은 실시간으로 계측되는 사용량을 나타내므로, 아직 24 : 00까지 표현되

(a) Northwest view (b) Southwest view

Fig. 5 External view of the building.

Fig. 6 A photograph representing predicted and measured energy consumption in IHD.

지 않았다(촬영된 사진은 오후 10시 13분이므로, 오후 10시까지 예측된 사용량만 그래프에서 표현되었다).

그래프에서 오전 시간동안에 모델링을 통한 예측 사용량이 실시간 계측 사용량보다 과 예측되고 있다. 이는 실제 냉동기와 공조기의 가동 시작 시간이 모델링에 입력된 스케줄의 가동 시작 시간과 차이가 발생하였기 때문이다. 또한, 점심시간과 피크 부하가 걸리는 14:00~15:00 동안에 냉동기와 공조기의 가동을 중단하였지만, 모델링에서는 반영되지 못하였다. 한편, 업무 이외의 오후 시간에 냉동기와 공조기의 가동을 중단할 것으로 예측하였으나, 공조기는 여전히 가동하고 있었다.

한편, 본 연구에서 제안한 방법은 시뮬레이션의 한계를 나타냈다. 시뮬레이션에서는 초기에 입력한 스케줄을 변동할 수 없다. 실시간으로 변동하는 스케줄에 대해서 모델링에 입력할 수 있어야 할 것이다. 그러나 스케줄의 오류를 제외하고, 실시간으로 입력된 기상 예보 데이터로 예측한 데이터 값은 모델링에서 잘 반영되어 예측되고 있음을 알 수 있었다. 실시간으로 변동하는 스케줄도 BCVTB에서 추가로 반영할 수 있도록

설계하면, 변동하는 스케줄에 대응하여 실제 계측되는 에너지 사용량과 유사하게 예측할 수 있을 것이다.

한편, 해당일의 실제 계측 사용량을 바탕으로 스케줄 보정을 진행하였다. Fig. 7은 실제 계측 사용량과 스케줄 보정된 모델링을 통한 예측 데이터의 사용량을 나타낸다. 시간별 오차로 MBE(Mean Bias Error)는 3.0%, Cv(RMSE)는 13.5%를 나타냈다.

5. 활용성 검토

본 연구에서 제안하는 실시간 에너지 수요예측은 실제 실시간 기상 예보 데이터를 기반으로 에너지 시뮬레이션을 수행하기 때문에, 실시간 기상 예보 데이터를 제공받는 국내 어느 지역에서든지 적용 가능하다. 기상청에서는 동네예보를 통하여 3시간 간격의 기상 데이터를 실시간으로 제공하고 있다. 이에 본 연구에서는 제안한 수요예측 방법의 최대 장점인 국내 어느 지역에서도 적용할 수 있다는 점을 검토하기 위하여, 대전을 제외한 국내 4대 도시(서울, 부산, 대구, 광주)를 대상으로 테스트하였다. 지역에 따른 기상의 변화를 고려하기 위하여 동일날짜(7월 26일)에 대하여 적용하였고, Table 1의 회귀 계수를 이용하여 해당 도시의 일사를 예측하여 적용되었다. Fig. 8은 국내 4대 도시에 에너지 수요예측을 적용하여 에너지 소비량을 비교하여 나타냈다. 에너지 소비량은 모두 다르게 나타났으며 대구 > 광주 > 부산 > 서울의 순으로 나타났다.

한편, Fig. 8은 이미 지나간 날짜에 대한 측정된 기상 데이터를 통하여 분석하였으므로, 엄밀히 표현하면, 실시간 수요 예측이라 할 수 없다. 그러나 결과에서 나타났듯이, 지역별 다른 기상 정보에 대하여 서로 다른 결과 값을 나타냈다. 시뮬레이션에서는 지역별 서로 다른 기상 정보를 입력받았고, 그에 대응하여 에너지 사용량의 결과를 나타냈다. Table 1의 회귀 계수를

Fig. 7 Comparison of predicted by calibration model and measured energy consumption.

Fig. 8 Energy consumption with energy demand prediction.

통하여 일사를 예측하면, 본 연구에서 제안하는 실시간 수요 예측 방법은 충분히 활용 가능성이 있다고 판단된다. 따라서 국내 어느 지역에서든지 BEMS를 구축하기 위한 기초 기능인 에너지 수요예측을 할 수 있을 것으로 기대된다.

6. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 BCVTB와 실시간 기상 예보 데이터를 활용한 실시간 에너지 수요예측 방법을 제안하였다. 주요 내용을 정리하면 다음과 같다.

(1) 에너지 시뮬레이션과 실시간 기상 예보 데이터를 서로 연결시키기 위하여 BCVTB를 설계하였다.

(2) 실시간 기상 예보 데이터를 입력하기 위하여 기상청의 동네예보 데이터를 활용하였다. 실시간 기상과 해당 지역에 맞게 수정된 회귀계수를 이용한 모델식을 통하여 전일사량을 계산하였고, 직달일사와 확산일사를 분리하여 시뮬레이션 입력되도록 설계하였다.

(3) 제안된 수요예측 방법을 냉방 시스템이 가동되는 평일에 적용해 보았고, 스케줄의 변동을 제외하면, 기상에 따른 냉방부하에 대하여 에너지 수요예측은 잘 이루어지고 있음을 확인하였다.

(4) 국내 대표 도시에 동일한 건물 모델로 시뮬레이션을 수행하여 활용가능성을 검토하였다. 일사 계산은 지역별로 수정된 회귀 계수를 이용하였고, 해당 지역의 기상을 활용하였다. 서로 다른 지역별 기상 변동에 따라서 그에 대응되는 결과 값을 나타냈고, 이로써 본 연구에서 제안하는 방법은 실시간 수요예측을 수행하기에는 충분하다고 판단되었다.

(5) 관리자의 운영 전략에 따른 운영 스케줄 변경은 초기에 모델링에 입력한 스케줄과는 다르기 때문에 시뮬레이션 시 반영을 따로 해야만 하는 시뮬레이션의 한계를 나타냈다. 관리자의 반응에 해당되는 실시간 스케줄을 입력받도록 수정이 필요하다.

후 기

본 연구는 한국에너지기술연구원의 주요사업으로 수행한 결과입니다(B3-2431-03).

참고문헌

1. Kwak, Y. H., Kong, D. S., Seo, D. H., Jang C. Y.,

and Huh, J. H., 2011, A case study for real-time energy demand prediction using virtual test-bed, Proceedings of Fall Annual Conference of the Korean Institute of Architectural Sustainable Environment and Building Systems, pp. 191-194.

2. Pedersen, L., 2007, Load modelling of buildings in mixed energy distribution systems, Doctoral Thesis, Norwegian University of Science and Technology.

3. EnergyPlus documentation, 2011, Application guide for EMS.

4. EnergyPlus documentation, 2011, External interfaces(s) application Guide.

5. Wetter, M. and Haves, P., 2008, A modular building controls virtual test bed for the integration of heterogeneous systems, Third National Conference of IBPSA-USA, SimBuild 2008, pp. 69-76.

6. Pang, X., Wetter, M., Bhattacharya, P., and Haves, P., 2012, A framework for simulation-based real-time whole building performance assessment, Building and Environment, Vol. 54, pp. 100-108.

7. Nouidui, T. S., Wetter, M., Li, Z., Pang, X., Bhattacharya, P., and Haves, P., 2011, BACnet and analog/digital interfaces of the building controls virtual test bed, Proceedings Building simulation 2011, pp. 294-301.

8. Seo, D., 2010, Development of a universal model for predicting hourly solar radiation-application : evaluation of an optimal daylighting controller, Ph. D dissertation, University of Colorado-Boulder, USA.

9. Seo, D. H. and Ihm, P. C., 2010, Comparative solar models performance analysis for typical meteorological year development of Korea, Journal of the Architectural Institute of Korea, Vol. 12, No. 1, pp. 147-154.

10. Watanabe, T., Urano, Y., and Hayashi, T., 1983, Procedures for separating direct and diffuse insolation on a horizontal surface and prediction of insolation on tilted surfaces, Transactions, No. 330, Architectural Institute of Japan, Tokyo, Japan, pp. 96-108.

11. Kwak, Y., Seo, D., Jang, C., and Huh, J.-H., 2013, Feasibility study on a novel methodology for short-term real-time energy demand prediction using weather forecasting data, Energy and Buildings, Vol. 57, pp. 250-260.