

# 성능진단 데이터로 보정된 모델을 이용한 기존건축물의 에너지시뮬레이션 기법

## Existing Building Energy Simulation Method Using Calibrated Model by Energy Audit Data

공동석(Dong-Seok Kong)<sup>1†</sup>, 김두환(Du-Hwan Kim)<sup>1</sup>, 장용성(Yong-Sung Chang)<sup>2</sup>, 허정호(Jung-Ho Huh)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>서울시립대학교 건축공학과, <sup>2</sup>GS건설기술연구소

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul 130-743, Republic of Korea

<sup>2</sup>GS E&C Building Science Research Team, Gyeonggi-do, Yongin, 449-831, Republic of Korea

(Received March 3, 2014; revision received March 25, 2014; Accepted: March 26, 2014)

**Abstract** This paper represents a method of existing building energy simulation using energy audit data. Energy audit must be carried out for reasonable analysis, because characteristics of existing buildings such as efficiency of fan, pump, flow rate, pressure, COP and operating schedule could be changed during the building operation. These building characteristics should be measured to estimate actual energy consumption of the existing building. In this study, we conducted energy audit and calculated energy savings for a 7-stories building as a case-study. The energy audit data were used to calibrate the building model of EnergyPlus simulation. Baseline model validated according to M&V guideline index. As a result, building characteristics are significant parameters making a big impact on energy savings in existing buildings.

**Key words** Existing buildings(기존 건축물), Energy simulation(에너지시뮬레이션), Energy audit(성능진단), Baseline model calibration(기준 모델 보정), Measurement and verification(M&V : 측정 및 검증)

† Corresponding author, E-mail: br011503@naver.com

### 기호설명

$MBE_{period}$	: 측정 기간 동안의 시뮬레이션과 측정 데이터의 총량적 오차, %
$RMSE_{period}$	: 측정데이터와 시뮬레이션 데이터의 분산
$Cv(RMSE_{period})$	: 측정 기간 동안의 시뮬레이션과 측정데이터의 분포적 오차, %
$A_{period}$	: 측정 데이터의 평균
$S$	: 시뮬레이션의 에너지사용량, [NM3] or [kWh]
$M$	: 측정데이터, [NM3] or [kWh]
$N$	: 데이터의 간격 수

### 하첨자

$period$	: 데이터의 측정기간, [12개월]
$interval$	: 데이터의 측정간격, [1월~12월]

## 1. 서 론

국가차원의 에너지소비를 줄이기 위한 방안으로 최근 건축분야에서는 다양한 제도적 대책들이 수립되고

있다. 대표적 예로, 건축물의 에너지절약 설계기준은 최근 5년 동안 4번 개정되며 건축물의 성능에 대한 기준을 강화하고 있고, 건축물 에너지효율등급 인증, 녹색건축 인증제도 등 다양한 방안들이 적용되고 있다. 이러한 제도들은 신규 건축물의 최소한의 성능을 규제하여 건축물의 에너지소비를 줄이는 것을 목적으로 한다. 하지만 이미 건축된 기존 건축물의 경우 신규 건축물처럼 성능을 제한할 수 없으므로 성능개선에 대한 권고 또는 유도 대안 밖에 제시할 수 없는 실정이다. 국토해양부의 2011년 건축물 통계 보도 자료에<sup>(1)</sup> 따르면, 국내 건축물 667만여 동 중 20년 이상 된 건축물이 58%, 10~20년 된 건축물이 24%, 10년 미만의 건축물이 18%이다. 10년 이상 된 건축물이 82%로 기존 건축물에 대한 에너지절감이 상당히 중요하다는 것을 알 수 있다.

기존 건축물의 에너지절감과 성능개선은 개보수를 통해서 이루어진다. 그러나 기존 건축물의 경우 성능진단을 통해서 건물의 성능을 이해해야하며, 명확한 에너지 절감량을 산출하고 이를 검증해야 한다. 이러한 측정 및 검증과정을 M&V라고 한다. 현재 국내에서는

적용 가능한 가이드라인이 구축되어 있지는 않지만 이러한 M&V 과정을 기반으로 한 기존 건축물의 개보수는 정확한 에너지 절감량 검증을 통해 체계적인 성과를 측정하는 것을 용이하게 한다. 그리고 사업에 대한 객관성과 신뢰성을 높여 기존 건축물의 에너지성능 개선에 큰 성과를 가져올 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 이러한 M&V 과정에서 사용되는 에너지시뮬레이션에 대한 문제점과 쟁점을 검토 후, 실제 성능진단 데이터를 반영한 시뮬레이션의 필요성과 방법에 대해서 논의하고자 한다.

## 2. M&V 가이드라인과 건물에너지시뮬레이션의 Baseline 관련 쟁점

### 2.1 M&V 가이드라인

대표적인 M&V 가이드라인은 IPMVP(International Performance Measurement and Verification Protocol), FEMP(Federal Energy Management Program), ASHRAE Guideline 14(Measurement of Energy and Demand Savings)로 정리될 수 있다. IPMVP는<sup>(2)</sup> 가장 널리 사용되는 가이드라인이며 대략 전세계 40국가 이상에서 사용되는 것으로 보고되고 있다.<sup>(3)</sup> IPMVP에서는 세부 내용에 따라서 평가 방법을 달리하여 옵션을 A~D로 정의하고 있다. 시뮬레이션을 사용하는 경우에는 반드시 보정된 시뮬레이션 방식을 사용하도록 하고 있으며, 이는 옵션 D에 해당한다. FEMP는<sup>(4)</sup> IPMVP와 상당히 유사한 가이드라인으로 미국에너지성에서 작성하였다. 이 가이드라인은 미국 연방정부와 계약을 하는 ESCO 기업들을 대상으로 활용하기 위한 지침이다. ASHRAE Guideline 14는<sup>(5)</sup> 먼저 기술된 2개의 가이드라인 보다는 조금 더 기술적이고 구체적인 방법론을 제공하고 있으며, 여기에는 통계적, 수치적인 방법론과 에너지절감량에 대한 불확실성을 산출하도록 정의하고 있다. 절감량의 불확실성이 50% 이하인 경우 적합한 사업으로 인정된다. 상기의 3가지 규정에서는 건축물의 에너지 절감량 산출을 위해 건축물의 성능을 나타낼 수 있는 적합한 Baseline 모델을 확보해야 한다. Baseline 모델은 대상건물의 실제 계측된 에너지사용량과의 오차가 적정범위 안에 있는 모델로 만들어져야 한다. 모델의 오차를 평가하기 위한 지표로 MBE(Mean Bias Error)와 Cv(RMSE : The coefficient of variation of the root mean square error)를 제시하고 있다. MBE는 기존의 에너지 사용량과 시뮬레이션 모델의 출력값 사이의 오차의 합산을 평가하는 지표이며, Cv(RMSE)는 오차의 제곱을 합산하여 다시 제곱근을 취하는 개념으로 분포적인 일치도를 보는 개념이다. 다음 식(1)은 FEMP에서 MBE를 산출하는 수식이며, 식(2)~식(4)는 Cv(RMSE)를 산

출하는 수식을 나타낸다.

$$MBE(\%) = \frac{\sum_{Period} (S - M)_{interval}}{\sum_{Period} M_{interval}} \times 100 \quad (1)$$

$$RMSE_{Period} = \sqrt{\frac{\sum (S - M)_{interval}^2}{N_{interval}}} \quad (2)$$

$$A_{Period} = \frac{\sum_{Period} M_{interval}}{N_{interval}} \quad (3)$$

$$Cv(RMSE_{Period}) = \frac{RMSE_{Period}}{A_{Period}} \times 100 \quad (4)$$

S는 시뮬레이션의 결과값, M은 실측된 에너지사용량을 나타내며 에너지원에 따라서 가스나 전력 사용량 등이 될 수 있다. N은 데이터의 간격수로 12개월의 데이터를 사용하는 경우 11을 적용한다. 이와 같은 오차는 가이드라인 별로 적정수준의 허용 가능한 범주를 갖으며 다음 Table 1은 허용 가능한 오차수준을 나타내고 있다. Table 1의 값보다 오차가 작은 경우 적정수준의 Baseline 모델로 적용이 가능하다. 완성된 Baseline 모델을 통한 에너지 절감량 산출은 Baseline 모델 에너지 사용량과 개보수가 끝난 후의 건물의 에너지사용량과의 차이로 계산되며 다음 식(5)와 같이 나타낸다.

$$Savings = (E_{Baseline} - E_{Post Installation}) \pm Adjustments \quad (5)$$

여기서, Adjustment는 시뮬레이션 모델의 단순화, 측정장비의 오차, 샘플링에서 오는 가정 등 모델과 실제 성능 사이에서 차이가 발생할 수 있는 요인들에 대한 부분을 의미하는 포괄적인 개념의 항이다.

### 2.2 건물에너지시뮬레이션의 Baseline 관련 쟁점

최근 건물에너지 분야에 대한 관심의 증대로 외피, 제어, 공조, 기기효율 등의 각 분야에서 다양한 기술들이 개발되고 있다. 이러한 다양한 기술들의 적용과 효과의 검증, 또는 기술 간의 연계를 위해서 시뮬레이션은 필수적인 도구이다. 그러나 시뮬레이션을 활용하는 연구는 신뢰성 문제에 직면한다. 더욱이 정밀 시뮬레

Table 1 Calibration tolerances by guideline

Index(%)	ASHRAE 14	IPMVP	FEMP
MBE <sub>month</sub>	± 5	± 20	± 5
Cv(RMSE) <sub>month</sub>	15	-	15

이션을 활용하는 경우, 표준화되지 않은 수많은 입력 데이터로 인하여 사용자간의 격차가 크게 나타나는 문제가 발생한다. 이 때문에 M&V 관련 가이드라인에서는 보정된 시뮬레이션 모델(Baseline Model) 사용할 것을 규정하고 있다. 그러나 현재 시뮬레이션 모델의 보정에 대한 명확한 개념과 표준화된 절차가 없기 때문에 보정에 대한 다양한 논쟁이 발생하고 있다.

Augenbroe의<sup>(6)</sup> 연구는 통계적인 관점에서 접근하는 방법으로, 시뮬레이션 모델의 결과값에 대한 불확실성을 제공하는 방법이다. 시뮬레이션의 많은 파라미터들은 정확한 값을 알 수 없으므로 통계적인 분포형태로 파라미터를 입력하고, 출력값 역시 통계적인 분포의 형태로 얻는 방법이다. 이 방법은 학술적으로 모델의 불확실성을 제공하므로 안정적인 결과물을 얻지만 수백 번 이상의 시뮬레이션을 수행해야하고, 상당한 통계적인 지식이 필요한 방법이다.

Reddy et al.의<sup>(7)</sup> 연구에서 시뮬레이션 모델의 보정은 프로그램의 다양한 입력값을 관측값과 예측값이 일치하도록 조절하는 과정이라고 정의하고 있다. 이 연구에서는 다양한 통계적 기법을 이용하여 시뮬레이션의 입력 파라미터를 영향력이 큰 파라미터와 작은 파라미터로 분류하는 전처리 과정을 통해서 시뮬레이션의 입력 파라미터의 개수를 줄인다. 그 후 몬테카를로 기법을 이용해서 수 백 번의 시뮬레이션을 수행하고, 이 중 Table 1에서 나타난 보정 지표를 만족하는 다수의 Baseline 모델들을 만들어낸다.<sup>(8-10)</sup> 이 연구에서는 이러한 Baseline의 집합을 “Feasible Trials”라고 한다. 이러한 다수의 가용한 Baseline의 집합을 작성하는 이유는 다수의 모델들이 시뮬레이션이 가질 수 있는 불확실성을 내포하고 있기 때문이다. 가령, A모델의 Cv(RMSE) 오차가 5%이고, B모델의 Cv(RMSE)오차가 6%라도 두 모델이 모두 기준값인 15%를 만족하기 때문에, A모델이 B모델 보다 우수하다고 할 수는 없으며 A모델과 B모델을 모두 분석하여 시뮬레이션 결과물이 가질 수 있는 오차와 한계를 명확히 해야 한다는 것이다. 이러한 연구방법은 시뮬레이션의 보정은 시뮬레이션을 수행하는 개인의 경험과 기술, 지식수준과 개인적인 방법의 차이에 따라서 결과물이 매우 상이하게 나타날 수 있는 과정이기 때문에 시뮬레이터의 능력과 경향을 가능한 배제하고 자동화된 과정을 통해서 균일한 값을 얻을 수 있는 방법이다.

반면, Raftery et al.의<sup>(11-13)</sup> 연구는 조금 다른 관점에서 접근한다. 이 연구는 정보의 질을 중요하게 생각한다. 시뮬레이션에 있어서 사용되는 정보는 다양한 소스에서 올 수 있고, 기존 건축물의 경우 노후화 및 운영적 측면으로 소스의 출처에 따라서 신뢰도가 다르다는 개념이다. Table 2에서 보는 바와 같이 각각의 정보는 우선순위가 있는데 이러한 우선순위는 측정데이터

Table 2 Hierarchy of source evidence<sup>(13)</sup>

Source	Class	range of variation(%)
BMS Data	1	0
Sensor Data	1	0
Spot-Measured Data	2	5
Physically Verified Data	2	5
As-Built Drawings	3	10
O&M Manuals	3	10
Commissioning Documents	3	10
Design Documents	4	15
Guides and Standards	5	30
Default Values	6	40
No Available Information	7	50

는 상위에 추정데이터일수록 하위에 배치되며 하위 데이터 일수록 값의 추정범위가 넓어지게 된다.

이와 같은 데이터의 우선순위는 장기적인 건물의 성능을 대변할 수 있는 BEMS 계측 데이터와 센서 데이터가 1순위이며, 단기적인 측정을 통해 취득된 데이터와 성능검증을 통해 취득된 데이터가 2순위, 준공도서과 커미셔닝 자료, 운영 매뉴얼이 3순위로 계측되지 않지만 직접적으로 영향을 주는 데이터가 다음 순위이다. 4순위부터는 추정데이터로 설계자료, 설계 가이드라인, 시뮬레이션의 기본값 등으로 하위 등급으로 내려갈수록 데이터의 추정 범위가 커지는 것을 알 수 있다. Raftery가<sup>(11)</sup> 제시한 보정 모델링 과정은 버전컨트롤 소프트웨어<sup>1)</sup> 모든 과정이 기록되며, 다른 사용자들과 이러한 입력정보를 투명하게 공개하고 공유하여 동일한 소스에서 입력정보를 사용하자는데 관점이 있다. 즉 이 또한 Reddy의 연구와 동일하게 사용자에게 따른 입력 변수의 차이에서 오는 오차를 줄이고자 하는데 같은 목적을 두고 있다.

이와 같은 기존의 연구들은 모두 계측데이터의 부재로 인해서 발생하는 시뮬레이션의 입력데이터를 어떻게 관리할 것인가라는 관점에서 출발한다. 즉 계측데이터의 부재는 시뮬레이션 결과물의 오차로 연결되므로 계측데이터의 확보를 위한 건물의 성능진단은 기존 건축물의 에너지시뮬레이션을 위해 필수적인 항목이다. 그러나 상황에 따라 기존 건축물은 BEMS를 갖추고 있지 않거나 활용이 어려운 경우가 많고, 에너지 시뮬레이션은 설계도서 및 가이드라인에 의한 정보로 수행되고 있는 실정이다. 때문에 사용자간의 격차와 오차수준이 상당히 클 수밖에 없다.

기존의 연구들은 데이터의 부재를 주로 학술적인

1) version control software : 문서의 변동사항을 관리하는 프로그램으로 파일의 입력정보 또는 버전이 변경될 경우 변경된 입력사항과 과정을 모두 저장하는 프로그램 임.

방법으로 극복하는데 초점을 맞추고 있다. 하지만 이러한 방법들은 현실적 기술적으로 적용하기 어렵고 많은 시간이 필요하다. 본 연구에서는 최소한의 성능진단을 통해서 필요한 데이터를 얻고 이를 시뮬레이션의 입력데이터로 사용하여 모델의 정확성을 높이는 방법을 제안하였다. 이 방법은 측정을 통한 정확한 데이터로 모델의 오차를 줄일 수 있는 방법으로 제 3장과 제 4장의 사례분석을 통해서 결과를 검증하였다.

### 3. 성능진단 사례분석

#### 3.1 대상건물 현황

대상건물은 대전지역에 있는 공공기관 건물인 K건물로 지상 7층, 지하 1층이고 연면적은 23,596 m<sup>2</sup>로 일반적인 업무용 건축물이다. 준공년도는 1994년으로 2013년 기준으로 20년이 되었다. 2012년 외피의 성능개선 공사를 수행한 이력이 있으며 상주인원은 800명 수준이다. Fig. 1은 대상건축물의 모습을 보여주고 있다.

상기 Fig. 2는 대상건물의 HVAC에 대한 다이어그램을 나타내고 있다. 흡수식냉온수기(ACH) 2대를 통해서



Fig. 1 External view of the building.

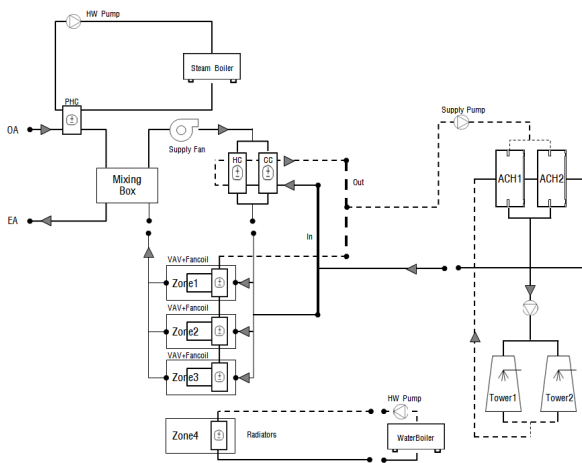


Fig. 2 Schematic diagram of HVAC.

냉난방에 이용하고, 외주부의 팬코일유닛(FCU)과 내주부의 VAV 유닛을 공조시스템으로 사용하고 있다. 1대의 스팀보일러는 공조기의 예열코일(PHC)에 연결되어 있고, 화장실과 공용부분의 동파 방지를 위한 라디에이터를 위해 1대의 온수보일러가 설치되어 있다. 또한 회의실과 강당에 EHP가 설치되어 간헐적으로 운전되고 있다. 대상건물의 VAV 시스템은 총 11기의 AHU로 공조영역을 분할하여 공급하도록 구성되어 있다. 대상건물의 인터뷰 결과 외기도입량이 적고, 현재 FCU는 사용하지 않고 VAV 유닛만을 가지고 사용하는 것으로 조사되었다.

#### 3.2 성능진단 항목 및 내용

대상건물의 성능진단은 2012년 4월, 2013년 2월, 7월의 총 3차례에 걸쳐 수행되었다. 중간기인 4월과 냉난방기인 2월, 7월에 건물의 운영스케줄에 맞추어 공조설비의 성능을 측정하였고, 최근 3개년의 에너지사용량과 BAS 시스템의 현황분석, 실내발열부하 조사, 열원설비의 성능검사를 수행하였다. 측정항목은 공조팬의 정압, 풍량, 전력과 순환펌프의 유량, 전력, 열원설비의 효율 등으로 건물의 노후화로 인한 성능저하 수준을 파악하고 실제 성능데이터를 입력하기 위한 조사가 수행되었다. Table 3은 수행된 성능진단의 세부적인 측정항목과 결과를 설계도면의 값과 비교하여 보여주고 있다.

성능진단은 전문업체의 도움을 받아 수행되었으며, 냉동기 및 보일러, 팬, 펌프의 각 항목들은 모두 건물의 운영시간 동안 측정되었다. 내부발열 요소인 조명과 기기의 밀도와(W/m<sup>2</sup>) 재실인원은 대상건물의 현장 조사를 통해 취득하였다.

Table 3을 통해서 보는 바와 같이, 기존 건축물은 노후화와 운영적 특성, 기상조건 등의 차이로 인해서 설계조건에 물성과는 많은 차이를 보인다. 설계조건에 가까운 정격상태의 수치이기 때문에 실측값과는 물론 차이가 있다. 그러나 이러한 값들은 건물의 성능적인 차이를 반영하기도 한다. 예로, 공조기의 공급팬의 경우 전력소비량은 설계값 14.9 kW와 측정값 14.6 kW로 2%의 차이를 보이지만, 정압과 풍량 경우 오차가 -8.3%, -68.2%~-56.8%로 상당한 차이가 있다. 비슷한 수준의 전력을 소비하면서, 풍량의 차이를 보이는 것은 노후화로 인한 성능저하 또는 누기로 인한 문제가 발생하고 있음을 알 수 있는 부분이다.

또한 상기의 데이터는 사용기간 동안의 건물의 변화를 나타낸다. 내부발열 조건은 설계당시 조건과 상당한 차이가 있음을 알 수 있다. 실제로 이러한 부분은 세부적인 조사가 없이는 알 수 없는 부분이다. 조명밀도의 경우 설계당시의 사무공간의 밀도는 10.5 W/m<sup>2</sup>이었지만, 실제로 조사된 밀도는 14.15 W/m<sup>2</sup>로 설계수준보다

Table 3 Comparison of energy audit value with design value(drawings)

Items		Design Values	Measured Values	Error[%]
COP [Unit-1, Unit-2]	Heating Mode	1.002/1.002	0.821/0.926	-18.1 ~ -7.6
	Cooling Mode	1.348/1.348	-	-
HotWater Boiler	Efficiency[%]	87.4	-	-
	Flow rate[m <sup>3</sup> /h]	316.9	280	-11.6
Pumps [Heating and Cooling]	Head[m]	25.3	20	-20.9
	Power[kW]	30	26.4	-12.0
	Efficiency[%]	95	64	-32.6
SupplyFans [AHU-2, AHU-3]	Pressure rise[mmAq]	105/105	96.3/82.1	-8.3
	Flow rate[m <sup>3</sup> /h]	31,500/28,020	10,017/12,098	-68.2 ~ -56.8
	Power[kW]	14.9/14.9	14.6/14.6	-2.0
Internal heat Gain	Efficiency[%]	60.4/53.8	18.1/18.5	-70.2 ~ 65.5
	Lighting[W/m <sup>2</sup> ]	10.5	14.15	34.8
	Equipment[W/m <sup>2</sup> ]	15.5	19.6	26.5
	Occupant[人]	1,062	784	-26.2

Table 4 Monthly operating time of absorption chiller and heater

Year/month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total[h]
2010	119	94	62	0	0	0	282	427	80	0	21	109	1,306
2011	209	98	42	2	0	59	102	142	44	3	13	135	772
2012	160	110	60	0	0	0	77	173	0	0	23	99	702
2013	102	50	5	0	0	0	22	75	0	0	-	-	254
Default	352	352	160	0	0	0	352	352	160	0	160	352	2,240

34.8% 증가된 수치이다. 기기밀도의 경우에도 26.5% 더 높은 수준인 것으로 나타났으며, 재실인원 또한 계획 1,062명, 조사 784명으로 26.2%의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이렇듯이 기존건물의 분석은 건물이 어떻게 사용되고, 사용기간 동안 어떻게 변경되었는지에 대한 이해가 필요하며, 실측 정보를 통해서 건물의 특성을 이해하는 과정이 필요하다.

건물의 특성을 나타내는 또 하나의 정보는 열원의 운전스케줄과 에너지사용량이다. 열원의 운전정보는 건물의 운영일지를 통해서 수집할 수 있고, 에너지사용량은 건물의 고지데이터를 통해서 월별 전력과 가스사용량을 알 수 있다. 다음 Table 4는 대상건물의 2010년부터 2013년의 4년간의 운영일지 기록을 나타내고 있다. Table 4의 운영시간은 흡수식냉온수기 2대의 운영시간의 합을 월별로 나타낸 것이다. Default는 일반적인 분석에서 사용하는 열원의 운전시간으로 건물의 운영일수×8시간(하루)으로 산출한 열원의 운전시간이다. 1월의 경우 22일×8시간×2대로 352시간으로 계산되었고, 중간기인 3월과 9월은 10일×8시간×2대로 160시간으로 계산하였다. 연간 총 운영시간을 살펴보면 2010년 1,306시간인 열원의 운전시간이 2011년 772시간으로 감소되었고, 2013년에는 254시간으로 감소되어 지속적인 감

소 추세에 있다.

2012년 9월 대상건물은 외벽의 단열재시공과 고단열 창호의 시공을 통해서 에너지절감을 도모했다. 그 결과 2012년의 508시간은(11월과 12월 제외) 2013년 같은 기간 동안 254시간으로 줄어들었다. 그리고 가스 소비량 역시 비유적으로 2012년에 비해서 50%, 전력은 87% 수준으로 감소했다.

그렇다면 단열시공으로 인한 에너지절감량이 각각 50%, 13%라고 할 수 있는 것인가? 2013년과 2012년은 조건이 다르기 때문에 에너지절감이 50%와 13%라고 단정 지을 수는 없다. 절감된 에너지량에는 단열성능 줄어든 냉난방 부하에 의한 절감량과 정부시책으로 인한 운전시간의 감소에 의한 절감량, 기상조건의 차이로 인한 오차가 포함되어있다. 실제로 2013년은 국가적인 전력부족난으로 인해서 공공기관의 전력 및 냉방 소비에 상당한 규제가 있었던 시기이다. 따라서 이와 같은 조건에서 에너지절감량을 산출하기 위해서는 에너지시뮬레이션을 이용해서 동일한 조건에서 절감량을 분석해야 한다. 다음 절에서 성능데이터를 이용한 에너지시뮬레이션 모델링을 통해서 Baseline 모델을 작성하고 단열성능 강화로 인한 에너지절감량을 산출하는 방법에 대해서 설명한다.

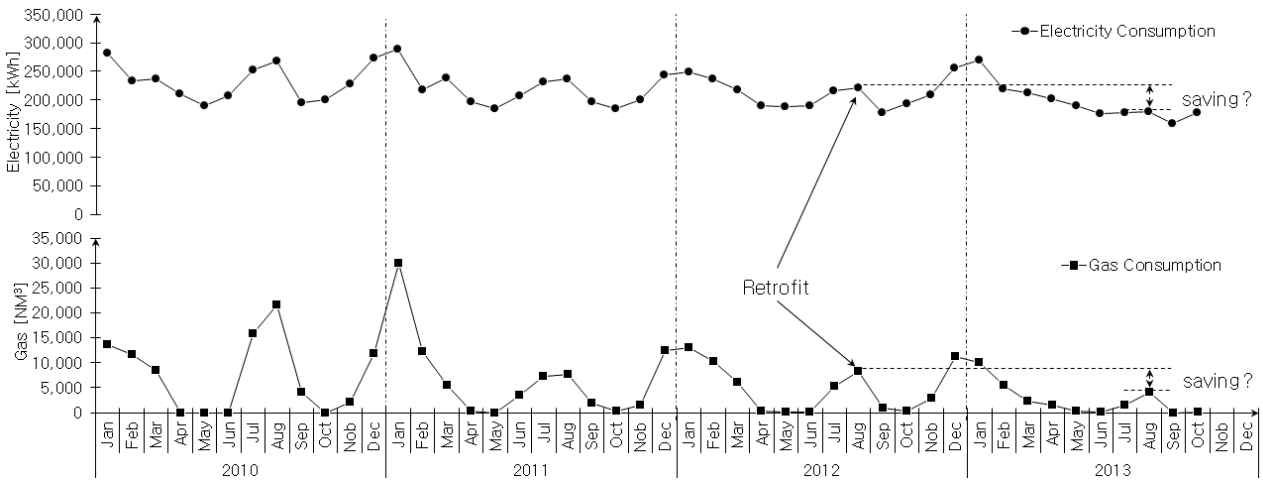


Fig. 3 Gas and Electricity Usage of Target Building(2010~2013).

#### 4. 에너지 절감량 시뮬레이션 분석

##### 4.1 EnergyPlus 모델링

대상건물의 에너지시뮬레이션은 EnergyPlus와 보조 프로그램인 Openstudio를 사용하여 진행하였다. 공조영역과 채실밀도, 사용목적에 따라서 조닝을 53개로 분할하였다. 채실밀도가 높은 일반사무실, 채실밀도가 낮은 임원사무실, 회의실, 로비, 화장실, 기계실, 강당, 식당, 주방, 주차장 등의 조닝을 포함한다. Fig. 4는 대상건물의 모델링 모습을 보여준다. 대상건물의 외피성능

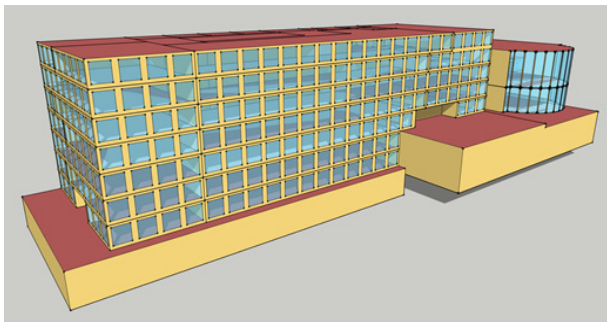


Fig. 4 Isometric View of EnergyPlus Model.

Table 5 U-value and SHGC of the building

	Type	U-value/SHGC
Pre-retrofit (2010~2012)	Ground Floor	0.48
	Roof	0.55
	External wall	0.61
	Window	3.00/0.65
Post-retrofit (2012~2013)	External wall	0.27
	Window	1.60/0.40

은 성능개선 이전과 이후로 구분되며, 2010년과 2011년, 2012년 8월까지의 정보를 바탕으로 열성능을 입력하였고, 2012년 9월부터 2013년은 단열공사 이후의 개선된 성능을 입력하였다. Table 5는 입력된 외피의 열관류율(U-value)과 태양열 취득계수(SHGC)를 나타낸다.

시뮬레이션의 HVAC 시스템은 VAV와 팬코일 유닛으로 모델링 되었으며, 입력값은 성능조사를 통해 도출된 수치들을 적용하였다. 시뮬레이션 상의 열원은 기존의 시스템과 동일하게 흡수식냉온수기 2기와, 예열코일용 온수보일러 1기로 모델링하였다. 운전스케줄은 운전일지의 월별 운전시간을 바탕으로 월별 스케줄을 작성하여 각각 다른 운전스케줄을 적용하였다. 내부발열 요소 역시 성능진단을 통해서 조사된 밀도를 적용하였다.

2010년부터 2013년의 기상데이터는 대전지역의 기상청 데이터를 가공하여 건구온도, 상대습도, 노점온도, 기압, 풍속, 풍향에 대한 정보를 입력하였고, 일사량의 경우 광영훈의(14) 연구를 참조하여 수평면전일사량을 직달일사와 산란일사로 직산분리하여 적용하였다. 시뮬레이션은 총 4개년에 대해서 수행되었으며, 해당연도의 운전스케줄과 기상데이터를 제외하면 동일한 조건으로 시뮬레이션 되었다. Fig. 5는 성능데이터를 기반으로 보정된 시뮬레이션의 결과를 보여준다. Fig. 5는 2010년~2014년 10월까지의 고지데이터와 시뮬레이션 결과를 비교하여 나타내고 있다. 시뮬레이션은 2010년부터 2014년까지의 운영데이터와 성능평가 데이터를 반영하여 수행되었고, 2012년은 8월까지의 성능개선 이전의 열관류율과 태양열취득계수를 적용, 2012년 9월부터 2013년 10월까지의 성능개선 이후의 값을 적용하였다(분석당시 고지데이터가 2013년 10월까지 임).

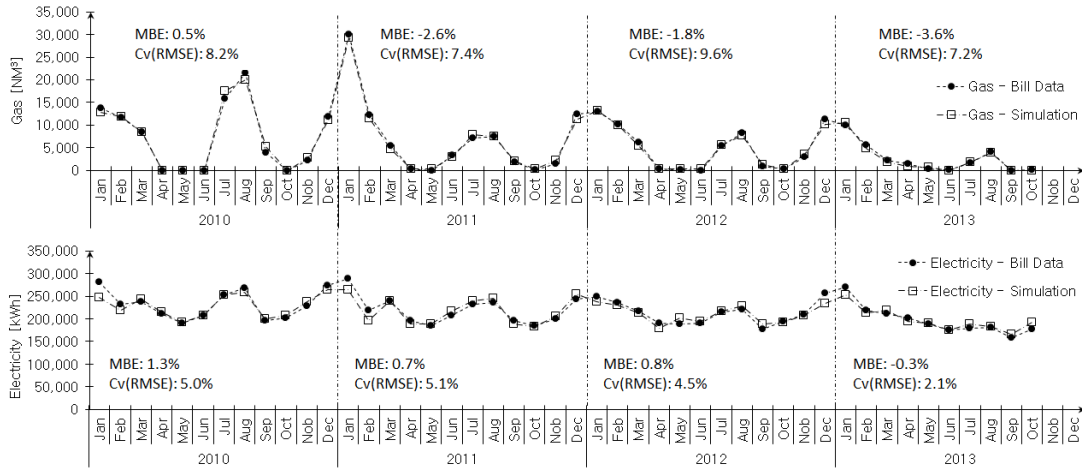


Fig. 5 EnergyPlus Model Calibration Result.

그 결과 가스 및 전력사용량에 대한 실측값과 시뮬레이션 값의 오차는 MBE의 경우 최대 3.6%, Cv(RMSE)의 경우 최대 9.6%로 제 2.1절에서 제시한 가이드라인의 기준치를 모두 만족하는 Baseline 모델이 작성되었음을 검증하였다.

#### 4.2 Baseline Model 기반의 에너지절감량 산출

시뮬레이션 모델을 통한 에너지절감량은 개보수 이전의 건물의 에너지사용량과 개보수 이후의 에너지사용량의 차이로 산출할 수 있으며, 동등한 조건에서 분석이 이루어져야 한다. 대상건물의 경우 2012년 건물의

외벽단열체 보수공사와, 건물외벽의 단창은 Low-e창으로 교체하는 전면적인 단열보강 공사가 수행되었다. 그 결과로 2013년의 에너지 사용량은 가스사용량 고지데이터만을 비교한 결과 2012년 대비 43%의 절감이 이루어졌다. 그러나 개보수가 수행되기 전인 2012년과 2013년은 건물의 운영시간의 차이가 크고, 기상적인 조건이 다르다. 따라서, 동등한 조건에서 분석하기 위해서는 시뮬레이션 프로그램을 이용한 방법이 가장 적절하다.

먼저 제 4.1절과 같이 작성된 Baseline 모델을 바탕으로, 2012년의 운영조건과 기상조건을 반영한 시뮬레이션을 성능개선 이전과 이후의 물성으로 수행하였고, 그 결과는 Fig. 6과 같다. Fig. 7은 2013년의 운영조건과 기

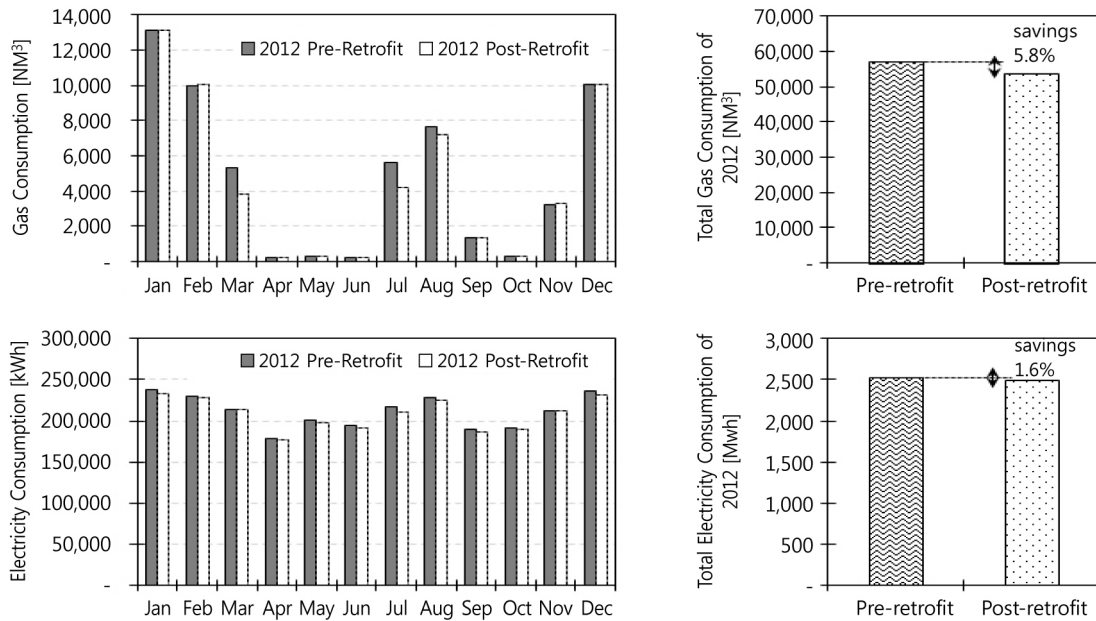


Fig. 6 Energy savings in 2012.

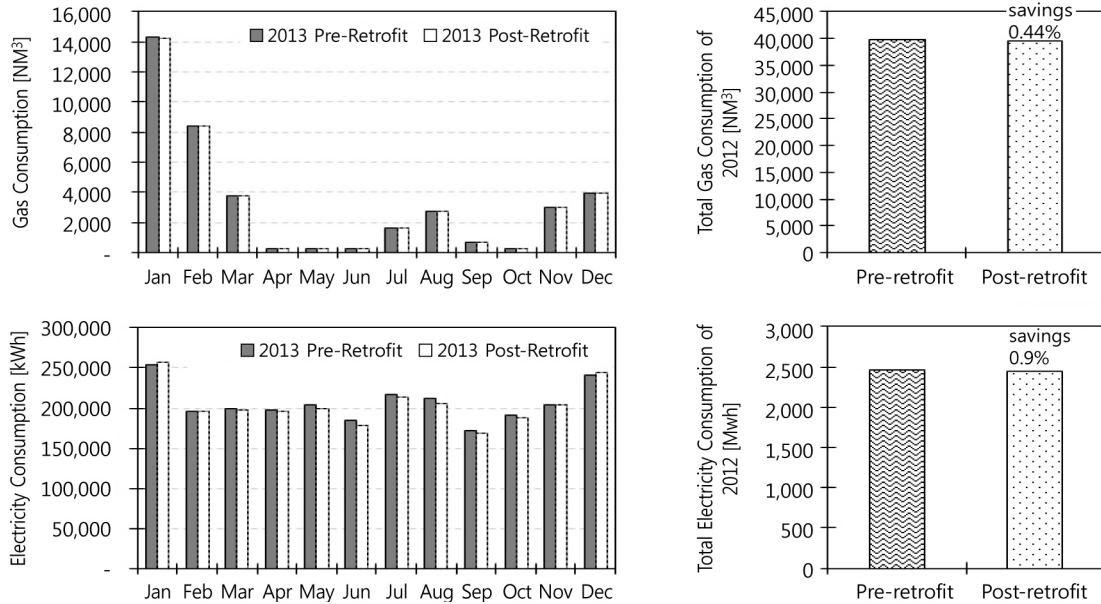


Fig. 7 Energy savings in 2013.

상조건으로 수행한 시뮬레이션 결과를 보여준다. 개보수 전과 후의 모델의 조건은 외벽과 창호의 열관류율을 제외하면 동일하다. 2012년의 경우 외벽과 창호의 성능강화로 인한 에너지절감 효과는 가스 5.8%, 전력 1.6%로 나타났고 2013년의 운영조건으로 시뮬레이션을 수행한 결과 에너지절감 효과는 가스 0.44%, 전력 0.9%로 운영조건이 바뀌므로써 에너지절감 효과가 상당히 감퇴함을 알 수 있다. 또한 건물의 2012년과 2013년의 에너지사용량의 감소는 상당부분이 운영조건의 변화로 인해서 발생된 것임을 알 수 있다.

이상의 결과는 에너지사용량만을 반영하여 작성된 결과이며, 실제 단열효과로 인해 실내온도와 채실자의 쾌적성이 향상된 부분은 고려되지 않았다. 그러나 성과보증 방식으로 수행되는 ESCO 사업의 경우 운영적 스케줄과 건물의 변화에 따라서 발생하는 절감량의 차이는 사업의 성패를 좌우하는 중요한 요인이 될 수 있다. 특히, 본 연구에서 사용한 공공건물과 같은 건물들은 다양한 제약조건 등이 발생할 수 있으므로, 개보수 항목의 선정 또는 에너지절감량의 보증에서 구체적인 절감방식과 기준을 제시해야 할 것이며, 에너지절감량은 철저한 건물의 진단과 분석을 통해서 제시되어야 한다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 기존 건축물의 성능진단을 기반으로 한 에너지시뮬레이션의 필요성과 방법을 제시하였고, 실제 성능진단을 기반으로 수행된 기존 건축물의 에너

지시뮬레이션을 통해서 발생될 수 있는 에너지사용량의 변화에 대해서 분석하였다. 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 기존 건축물의 에너지시뮬레이션에 대한 다양한 쟁점들과 사용자간의 격차는 실측데이터의 부재로 구체적인 건물의 특성을 파악하지 못하는데서 발생하며, 이를 위해 구체적인 건물의 성능진단이 수행되어야 한다.
- (2) 공공기관의 7층 규모 업무용 건축물에 대해 공조팬, 펌프, 냉동기, 내부발열 등에 대한 성능진단과 조사를 수행하였으며, 그 결과 설계도서와 최대 70%까지 차이가 발생하는 것으로 나타났다.
- (3) 성능진단 데이터를 바탕으로 Baseline 모델 작성을 위한 에너지 시뮬레이션을 수행하였고, 최근 4년간의 가스사용량과 전력사용량에 대한 월별데이터 46 포인트에 대해서 검증을 수행하였다. 검증결과 MBE와 Cv(RMSE) 각각 최댓값이 3.6%, 9.6%로 가이드라인의 기준에 적합한 모델이 작성되었다.
- (4) 보정된 시뮬레이션 모델을 기반으로 대상건물의 에너지절감량을 분석하였으며, 건물의 운영적 측면의 변화에 따라 절감량은 크게 달라질 수 있는 것으로 나타났다. 이는 성과보증방식의 ESCO사업 수행 시 고려해야하는 중요한 항목이다.
- (5) 향후 체계적인 성능진단에 대한 방법과 관련한 가이드라인 연구가 수행되어야 할 것이며, 에너지시뮬레이션과 연계시키기 위한 측정항목과 필요데이터의 수준들이 민감도 분석 등의 기법을 통해서 명확하게 정해진다면 효과적으로 건물의 성능평가를 기반으로 한 에너지시뮬레이션이 수행될 수 있을 것이다.



## 후 기

본 연구는 국토해양부가 주관하고 국토교통과학기술진흥원이 시행하는 2013년도 도시건축사업의 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다(과제번호 : 11 도시건축 G02).

## Reference

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea, web site, [http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m\\_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95067770](http://www.molit.go.kr/USR/NEWS/m_71/dtl.jsp?lcmepage=1&id=95067770).
2. Efficiency Valuation Organization(EVO), International Performance Measurement and Verification Protocol (IPMVP) Public Library of Documents, [http://www.evo-world.org/index.php?option=com\\_content&task=view&id=272&Ite](http://www.evo-world.org/index.php?option=com_content&task=view&id=272&Ite).
3. Huh, J. H., 2013, Measurement and verification for energy saving calculation, Magazine of the SAREK, Vol. 42, No. 9, pp. 30-39.
4. U. S. Department of Energy Federal Energy Management Program, 2008, M&V Guidelines : Measurement and verification for federal energy projects Version 3.0, [http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/mv\\_guidelines.pdf](http://www1.eere.energy.gov/femp/pdfs/mv_guidelines.pdf).
5. ASHRAE, 2002, ASHRAE Guideline 14-2002 for measurement of energy and demand savings, ASHRAE, Atlanta.
6. Heo, Y., Choudhary, R., and Augenbroe, G. A., 2012, Calibration of building energy models for retrofit analysis under uncertainty, Energy and Buildings, Vol. 47, pp. 550-560.
7. Reddy, T. A., 2005, Literature review on calibration of building energy simulation programs: Uses, Problems, Procedures, Uncertainty, and Tools, ASHRAE Transactions, Vol. 112, pp. 226-240.
8. Sun, J. and Reddy, T. A., 2006, Calibration of building energy simulation programs using the analytic optimization approach(RP-1051), HVAC&R RESEARCH, Vol. 12, pp. 117-196.
9. Reddy, T. A., Maor, I., and Panjapornpon, C., 2007, Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data-Part I : General methodology(RP-1051), HVAC&R RESEARCH, Vol. 13, pp. 221-241.
10. Reddy, T. A., Maor, I., and Panjapornpon, C., 2007, Calibrating detailed building energy simulation programs with measured data-Part II : Application to three case study office buildings(RP-1051), HVAC&R RESEARCH, Vol. 13, pp. 243-265.
11. Raftery, P., Keane, M., and O'Donnell, J., 2011, Calibrating whole building energy models : An evidence-based methodology, Energy and Buildings, Vol. 43, pp. 2356-2364.
12. Coakley, D., Raftery, P., and Molloy, P., 2012, Calibration of whole building energy simulation models : Detailed case study of a naturally ventilated building using hourly measured data, Proceedings, First Building Simulation and Optimization Conference, Loughborough, UK, pp. 57-64.
13. Raftery, P., 2011, Calibrated whole building energy simulation : An evidence-based methodology, Ph.D. thesis, National University of Ireland, Galway, Ireland.
14. Kwak, Y. H., Chun, S. H., Jang, C. Y., and Huh, J. H., 2013, Real-time energy demand prediction method using weather forecasting data and solar model, Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 25, No. 6, pp. 310-316.