

## 건물에너지 모니터링 및 시뮬레이션을 활용한 신축건물의 에너지성능평가

송 수 원<sup>†</sup>

연세대학교 친환경건축연구센터

### Energy Performance Evaluation of a New Commercial Building using Calibrated As-built Simulation with Monitoring Data

Suwon Song<sup>†</sup>

*Center for Sustainable Housing, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea*

*(Received November 22, 2007; revision received January 15, 2008)*

**ABSTRACT:** The performance evaluation of a new building is becoming more important because efficient design alone is often not sufficient to deliver an efficient building. However, there is a lack of standard evaluation methods to measure the energy performance of a new construction that has Energy Conservation Design Measures (ECDMs). This study presents an enhanced method based on calibrated whole-building simulation for evaluating the energy performance of new commercial buildings and demonstrates its use using a case-study building, including : an Energy Use Index (EUI) comparison with sub-metered data and an evaluation of the performance of specific ECDMs. The use of this method has determined that the case-study building was shown to use approximately 47% less energy than the base-case building that has the same shape and function as the case-study building (i.e., calibrated as-built simulation model), but doesn't include the simulated ECDMs.

**Key words:** New building(신축건물), Energy conservation design measure(에너지절약 설계요소), Calibrated as-built simulation(보정된 시뮬레이션), Performance evaluation(성능평가)

#### 기 호 설 명

$COP$  : 성적계수  
 $F2$  : 열전달 계수  
 $P_{exp}$  : 외부에 면하는 둘레의 길이 [m]  
 $R_{fic}$  : 가상층의 열전달 저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]  
 $R_{eff}$  : 유효 열전달 저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]  
 $R_{us}$  : 지표면의 열전달 저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]  
 $R_{soil}$  : 지중의 열전달 저항 [ $m^2 \cdot K/W$ ]

$T_i$  : 실내온도 [K]  
 $T_g$  : 지중온도 [K]  
 $U_{eff}$  : 유효 열괄류율 [ $W/m^2 \cdot K$ ]

#### 1. 서 론

에너지효율적인 건물을 건축하기 위해서는 에너지절약적인 설계요소를 도입하는 것뿐만 아니라, 건물이 완공된 후에도 적용된 설계요소들이 실제로 어느 정도의 에너지절약 효과가 있는지 전체 건물에너지 성능의 관점에서 종합적으로 평가하는 것이 중요하다.

<sup>†</sup> Corresponding author

Tel.: +82-2-2123-7830; fax: +82-2-313-7831

E-mail address: swsong@yonsei.ac.kr

이와 관련하여, 미국에서는 신축건물의 에너지 성능평가에 대한 연구를 1980년대 초반부터 지속적으로 수행하고 있으며, 2001년도에는 IPMVP-Volume I(International performance monitoring and verification protocol)를 제시하여 기존건물의 에너지성능평가 방법을 정립하였으며,<sup>(1)</sup> 2003년도에는 신축건물에 대한 에너지성능평가 기법을 IPMVP-Volume III에 추가하고 관련사례를 소개하였다.<sup>(2)</sup> 또한, 미국 NREL(National Renewable Energy Laboratory)에서는 에너지 효율적으로 설계된 다수의 건물을 대상으로 모니터링 및 시뮬레이션을 수행하고, 이를 바탕으로 전체건물에너지성능평가방법 및 적용사례를 소개하였다.<sup>(3)</sup> 국내에서도 친환경건물의 인증제도와 관련하여 전체건물에너지 성능의 관점에서 에너지절약 요소기술에 대한 평가에 많은 관심을 보이고 있지만 아직까지 신축건물에 대한 표준화된 에너지성능평가 방법 및 다양한 적용사례가 미흡한 실정이다.

한편, 지금까지 수행된 신축건물의 에너지성능평가는 기상자료를 바탕으로 건물 및 시스템의 다양한 요소들의 상호관련성을 종합적으로 평가할 수 있는 건물에너지해석 프로그램을 주로 사용하고 있으며, 그 중에서도 가장 많이 사용된 프로그램은 미국의 에너지성(Dept of Energy)의 지원 하에 LBNL(Lawrence berkely national laboratory)을 비롯한 다수의 연구기관이 공동으로 개발한 DOE-2 건물에너지해석 프로그램이다. DOE-2 프로그램은 이미 전 세계적으로 많은 검증을 거쳐서 프로그램의 정확성과 신뢰성을 인정받고 있지만 실제건물의 에너지성능평가를 위한 타당성인 있는 시뮬레이션 결과를 도출하기 위해서는 먼저, 모델의 입력 자료가 신뢰할 수 있어야 하며 이를 위해서는 체계적인 보정방법과 분석기법이 수반되어야 한다.

본 연구에서는 에너지 효율적으로 설계된 신축건물을 대상으로 에너지모니터링 및 시뮬레이션을 활용한 건물의 에너지성능평가에 관한 사례연구를 수행하였으며, 이를 통하여 대상건물의 에너지성능 및 에너지절약 설계요소들에 대한 에너지절약 효과를 정량적으로 평가하였다. 대상건물의 시뮬레이션은 DOE-2.1E(ver. 119) 건물에너지해석 프로그램을 사용하였으며, 결과에 대한 타당성은 통계적인 방법과 그래픽적인 방법을 사용하여 검증하였다.

## 2. 사례연구 대상건물

### 2.1 대상건물의 개요

대상건물은 미국 Austin, Texas에 위치한 주정부 사무소용 건물로써 지하 1층, 지상 5층 규모의 철근 콘크리트 구조이며, 연면적은 28,185m<sup>2</sup>이다. Fig. 1은 대상건물의 남측 전경을 보여주고 있다.

대상건물은 1998년도에 신축되었으며 다양한 에너지절약 설계요소들이 도입된 건물이다.<sup>(4)</sup> 건물의 외벽은 약 50%가 유리창으로 구성되어 있으며, 두 가지 유형의 Low-e 유리가 상부와 하부에 나누어져 있다. 창 상부는 투명 복층 Low-e 유리로 구성되었으며 자연채광이 실내부에 깊숙이 유인되도록 광선반(Light shelves)이 실 내측에 설치되었다. 또한, 실내에 설치된 조도센서는 형광등의 밝기를 조절함으로써 조명에 의한 전기사용량을 절약할 수 있도록 하였다. 창 하부는 옅은 푸른색의 복층 Low-e 유리가 사용되어 건물의 냉/난방부하를 줄일 수 있도록 하였다.

건물의 공조시스템은 대부분 이중덕트가변풍량시스템으로 구성되어 있으며, 이중덕트의 혼합손실을 방지하기 위하여 냉/난방 공급 측에 각각 풍량제어가 가능한 변속팬이 설치되었다. 지하층의 공조시스템은 각 실의용도 및 열적특성을 고려하여 가변풍량시스템과 정풍량시스템이 혼합되어 배치되었다. 열원시스템으로는 고효율 냉동기와 보일러, 그리고 냉각탑이 설치되었으며, 냉수와 온수를 전달하는 펌프시스템은 1차측(Primary loop)



Fig. 1 South façade with deciduous trees in summer.

Table 1 Energy conservation design measures(ECDMs)

Energy Conservation Design Measures(ECDMs)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Low-e window glazing</li> <li>• Motion Sensors for lighting control</li> <li>• Daylighting dimming systems with light shelves</li> <li>• A high albedo roof, tree shading</li> <li>• Dual-duct variable air volume system (DDVAV) with air foil HVAC fans</li> <li>• Enthalpy heat recovery system</li> <li>• High efficiency low NOx boiler</li> <li>• High efficiency centrifugal chiller</li> <li>• Primary-secondary chilled water loops</li> <li>• Variable Frequency Drive(VFD) on the secondary loop</li> <li>• Oversized cooling tower</li> <li>• Low head pump</li> </ul>

과 2차측(Secondary loop)로 구분되고 2차측 펌프에는 변속장치(VFDs)가 설치되어 공급유량을 조절하도록 하고 있다. Table 1은 대상건물에 적용된 주요 에너지절약설계요소를 보여주고 있다.

2.2 대상건물의 에너지모니터링

대상건물은 에너지의 효율적인 관리를 위해서 신축당시 별도의 모니터링시스템을 설치하여 지속적인 모니터링을 수행하고 있으며, 이를 통하여 건물의 에너지성능 및 각종 설비시스템의 운전 형태를 진단하고 있다.

Table 2는 대상건물의 모니터링을 위한 각종 채널에 관한 정보를 나타내고 있다. 전기사용량에 대한 모니터링은 전체건물의 전기사용량(WBE), 외부의 기상조건에 따라 변화하는 냉동기, 냉각탑, 공조기, 펌프, 팬 등이 연결된 Motor Control Center(MCC)의 전기사용량, 그리고 건물의 운영시간과 관련이 있는 조명 및 기기의(WBE-MCC) 전기사용량으로 구분하였다. 또한, 대상건물 4층의 전기사용량은 별도로 모니터링 하였으며, 이를 바탕으로 기준층의 조명 및 기기의 전기사용량을 파악하였다.

Fig. 2는 대상건물 전체의 전기사용량을 모니터링하기 위한 Data logger를 보여주고 있으며, Fig. 3은 냉동기의 전기사용량을 모니터링하기 위하여 MCC 패널에 설치된 Current Transducer

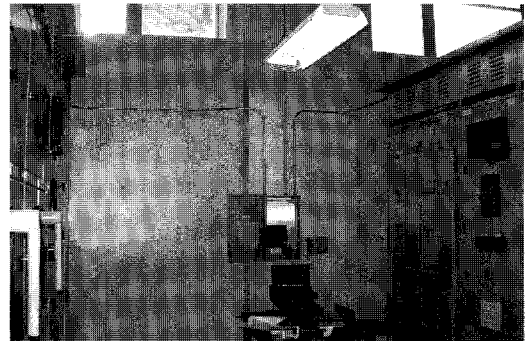


Fig. 2 Whole-building electricity (WBE) panel connected to the data logger.

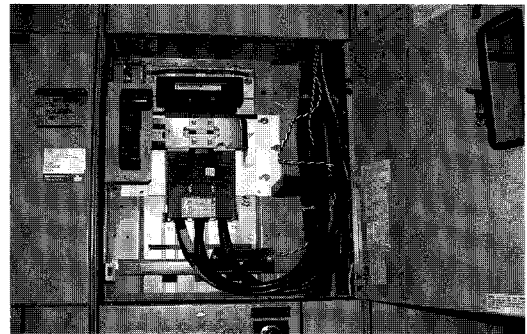


Fig. 3 Motor control center (MCC) panel with current transducers (CTs).

(CTs)를 보여주고 있다. 한편, 냉동기와 보일러의 냉/온수의 공급 및 환수온도를 모니터링 하기 위하여 Resistance Temperature Detector(RTD) 센서를 설치하고 유량계(Flow Meter)를 사용하여 냉/난방 환수유량을 모니터링 하였으며, 이를 바탕으로 대상건물의 냉방에너지(WBC) 및 난방에너지(WBH)를 산출하였다(Table 3). 대상건물의 모니터링에 사용된 센서들은 설치전과 후에 제조사의 시방서를 바탕으로 보정계수(Scale factor 및 offset)를 조정하여 보정하였다.<sup>(5)</sup>

Fig. 4는 대상건물의 실제 전기사용고지서를 바탕으로 산출한 연간 총 전기사용량 및 에너지원 단위를 보여주고 있으며, 2001년부터 건물이 정상적으로 운전되고 있음을 나타내고 있다. 본 연구에서는 대상건물의 모니터링데이터의 신뢰성을 검증하기 위하여 2001년과 2004년의 실제 월별 전기사용고지서와 모니터링데이터를 비교하였으며, Fig. 5는 모니터링데이터가 실제 에너지사용량과 거의 일치함을 보여주고 있다.

Table 2 Monitoring channel description

Items	Description	Unit	Channels	Remarks
WBE	Whole Building Electricity	kWh/h	Building Electricity 1 Phase A(ch4497)	WBE 1(Phase A+B+C)
			Building Electricity 1 Phase B(ch4498)	
			Building Electricity 1 Phase C(ch4499)	
			Building Electricity 2 Phase A(ch4500)	WBE 2(Phase A+B+C)
			Building Electricity 2 Phase B(ch4501)	
			Building Electricity 2 Phase C(ch4502)	
MCC	Motor Control Center	kWh/h	MCC Electric Phase A(ch4476)	Phase A + Phase C
			MCC Electric Phase C(ch4477)	
L&R	Lighting & Receptacles	kWh/h	WBE - MCC	Weather independent electric use
Chillers	Chiller #1	kWh/h	Electricity Phase A(ch4478)	Phase A + Phase C
		kWh/h	Electricity Phase C(ch4479)	
		kBtu/h	User Defined Channel(ch4520)	(GPH * (supply - return)temp.)/2
		GPH	Chilled Water Flow(ch4484)	-
		°F	Chilled Water Supply Temp.(ch4485)	-
		°F	Chilled Water Return Temp.(ch4486)	-
	Chiller #2	kWh/h	Electricity Phase A(ch4480)	Phase A + Phase C
		kWh/h	Electricity Phase C(ch4481)	
		kBtu/h	User Defined Channel(ch4521)	(GPH * (supply - return)temp.)/2
		GPH	Chilled Water Flow(ch4489)	-
		°F	Chilled Water Supply Temp.(ch4490)	-
		°F	Chilled Water Return Temp.(ch4491)	-
Boiler		kBtu/h	User Defined Channel(ch4522)	(GPH * (supply - return)temp.)/2
		GPH	Hot Water Flow(ch4494)	-
		°F	Hot Water Supply Temperature(ch4495)	-
		°F	Hot Water Return Temperature(ch4496)	-
4th floor	The 4th Floor Electricity Use	kWh/h	East(ch4506 + ch4507 + ch4508)	Light and Receptacles Electricity Use
			Central(ch4509 + ch4510 + ch4511)	
			West(ch4512 + ch4513 + ch4514)	
			Receptacle(ch4515 + ch4516 + ch4517)	Receptacle Electricity Use
			(East + Central + West)-Receptacle	Lighting Electricity Use

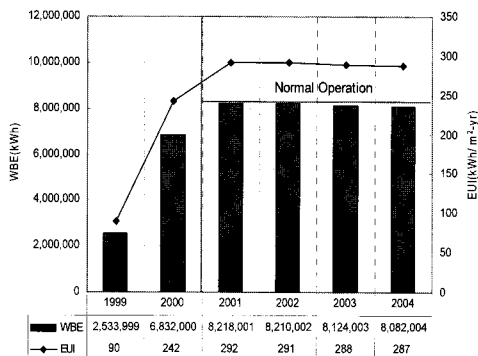


Fig. 4 Total electricity utility billing data.

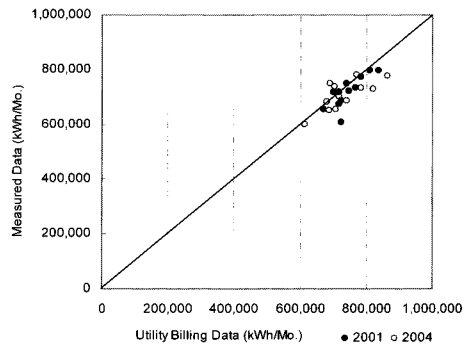


Fig. 5 Comparison of electricity use between utility billing data and measured data.

### 3. 시뮬레이션 모델 및 조건

대상건물의 시뮬레이션은 동적 건물에너지해석 프로그램인 DOE-2.1e(ver. 119)를 사용하였다. DOE-2 시뮬레이션을 위한 기상자료는 기상청 실측데이터를 바탕으로 Test Reference Year(TRY)형태로 변화하여 사용하였으며,<sup>(6)</sup> 실측된 기상자료는 수평면 일사량 및 직단 일사량을 포함하고 있다. 건물의 지하층과 지층의 열교환을 위한 지중온도는 DOE-2 프로그램의 Weather Processor에 의하여 자동으로 계산하도록 하였으며 기상자료의 월평균 외기온에 근거하여 계산된다.

#### 3.1 건물모델

대상건물은 주출입구와 차량의 연결 통로를 기준으로 크게 세부부분으로 나누어져 있으며, 건물의 전면부에는 나무를 심어서 여름철에 그늘을 제공하도록 하였다. 또한, 별도의 컨퍼런스센터가 건물의 북동쪽에 주차건물과 인접하고 있다. Fig. 6은 대상건물의 시뮬레이션 모델을 Drawbdl 프로그램을 이용하여 표현한 것이다. 시뮬레이션을 위한 실의 조닝은 기본적으로 내주부와 외주부로 구분하였으며 건물의 공조 조닝에 기초하여 모델링하였다. Fig. 7은 대상건물의 지상 1층의 조닝을 보여주고 있다.

Table 3은 기준층의 내부발열조건을 DOE-2의 입력조건을 기준으로 나타내고 있으며 주로 모니터링데이터를 시뮬레이션의 입력 값으로 사용하였다. 조명 및 기기의 발열밀도는 매시간 모니터링데이터의 최댓값을 건물의 연면적으로 나누어서 산출하였으며, 시뮬레이션을 위한 조명 및 기기의 스케줄은 모니터링데이터를 통계 처리한 중간 값을 사용하였다.<sup>(7)</sup> Fig. 8(a)는 대상건물 전체의 조명 및 기기의 주중스케줄을 보여주고 있다. 주말스케줄 역시 모니터링데이터를 사용하였으며 주중스케줄과 동일한 방식으로 작성하였다. 재실 밀도는 최대 재실자의 수(약 1000명)를 연면적으로 나눈 값을 사용하였으며, 재실스케줄은 기준층의 조명스케줄을(Fig. 8(b)) 보정하여 사용하였다. 공조시스템의 운전은 대상건물이 위치한 Texas의 고온다습한 기후 특성을 고려하여 연중 24시간 가동하고 있다. 따라서 실내압이 항상 정압을 나타내고 있어 침기는 없는 것으로 간주하였다.

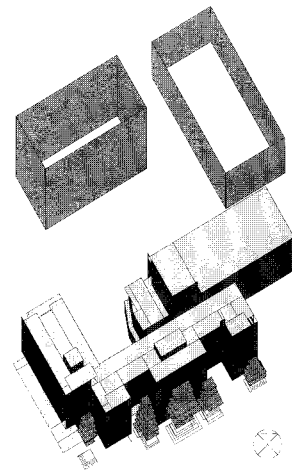


Fig. 6 Rendering of the DOE-2 model used for the case-study building.

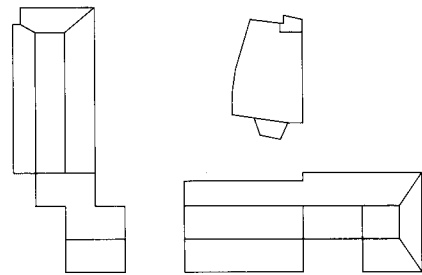
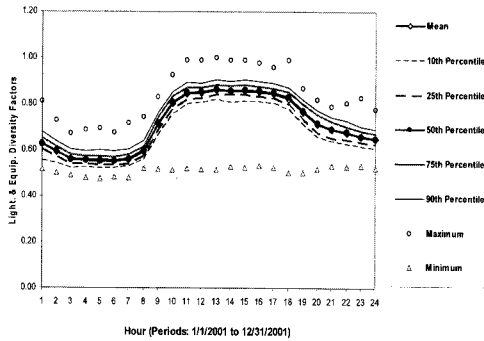


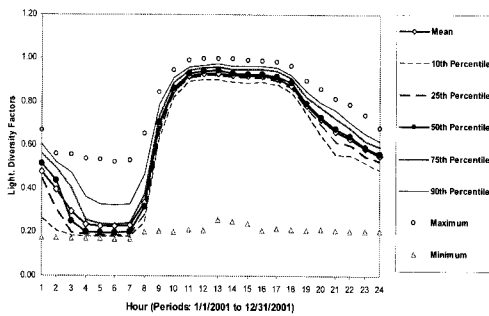
Fig. 7 Space zoning of the 1st floor.

Table 3 Space conditions for the typical(4th) floor

Items	Space Conditions	Remarks
AREA/PERSON	25.5 m <sup>2</sup>	Number of people (Around 1000)
PEOPLE-HG-SENS	67.4 W	-
PEOPLE-HG-LAT	55.7 W	-
PEOPLE-SCHEDULE	Scheduled	Based on Lighting Schedule
LIGHTING-TYPE	SUS-FLOOR	-
LIGHTING-W/SQFT	13.7 W/m <sup>2</sup>	Measured Data
LIGHTING-SCHEDULE	Scheduled	Measured Data
EQUIPMENT-W/SQFT	8 W/m <sup>2</sup>	Measured Data
EQUIP-SCHEDULE	Scheduled	Measured Data
INF-METHOD	Air-change	-
AIR-CHANGE/HR	0	HVAC is always on (No infiltration)



(a) Whole-building schedule(WBE-MCC)

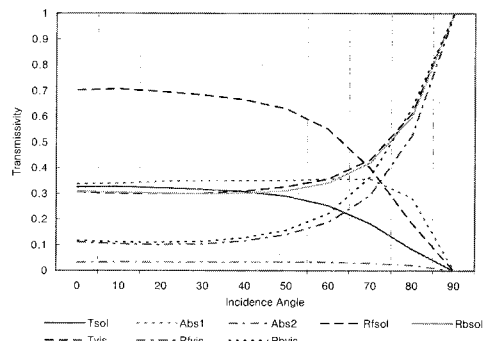


(b) Typical floor(4th) lighting schedule

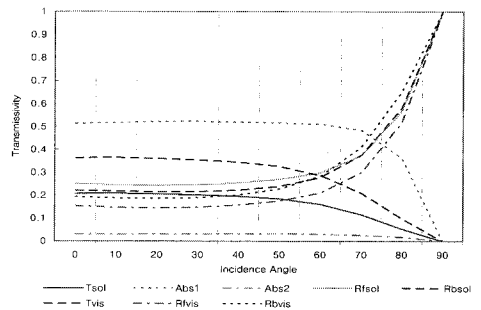
Fig. 8 Weekday lighting and equipment (L&R) schedule.

건물 외피의 약 50%를 이루는 Low-e 유리에 대한 특성은 유리제조사의 시방서를 바탕으로 Window 5.2 프로그램을 활용하여 작성하였다. 이를 바탕으로 DOE-2 프로그램은 유리의 단열성능 뿐만 아니라 태양의 입사각에 따른 일사의 영향을 고려할 수 있다. Fig. 9(a)와 Fig. 9(b)는 대상 건물의 상하부의 low-e 유리의 일사와 가시광선의 투과율과 흡수율이 태양의 입사각에 따라 변화하는 모습을 나타내고 있다. 상부의 유리는 투명 low-e 유리로 가시광선의 투과율이 입사각 30도까지 70%에 이르며 입사각이 커질수록 점점 작아지고 있으며, 일사의 투과율은 입사각 50도까지 30%에 이르며 입사각이 커질수록 점점 작아지고 있다. 반면에 하부의 low-e 유리는 가시광선의 투과율이 입사각 40도까지 약 35%에 이르고 입사각이 커질수록 작아지고 있으며, 일사의 투과율은 입사각 50도까지 20%에 이르고 입사각이 커질수록 점점 작아지고 있다.

시뮬레이션을 위한 구조체의 구성은 대상건물의 건축도면을 바탕으로 작성하였으며, DOE-2 프



(a) Upper low-e glazing



(b) Lower Low-e glazing

Fig. 9 Transmissivity vs. angle of incidence for low-e glazing.

로그래의 CWF(Custom Weighting Factor)법을 활용하여 건물의 축열성능을 고려하였다.<sup>(8)</sup> 지하층의 경우 일반적으로 지중과 만나는 면적을 그대로 사용하면 과도한 열전달이 발생하므로 U-effective라는 별도의 열전달 계수를 식(1)~식(3)을 사용하여 계산하였다.<sup>(9)</sup> Table 4는 계산식을 대상 건물의 지하층에 적용하여 산출한 결과를 보여주고 있다.

$$Q = [U-effective] * A * (T_g - T_i) \quad (1)$$

여기서, U-effective = 1/R<sub>eff</sub>

$$R_{eff} = A / (F2 * P_{exp}) \quad (2)$$

$$R_{fic} = R_{eff} - R_{us} - R_{soil} \quad (3)$$

여기서, R<sub>fic</sub>은 가상의 열전달저항 값으로 지중과 면하는 부분의 유효한 열전달저항을 계산하기 위한 것이며, R<sub>us</sub>는 지하층 표면의 열전달저항 값을, 그리고 R<sub>soil</sub>는 토양에 대한 열전달저항 값을 나타내고 있다.

Table 4 U-effective for underground wall and floors

Items	Underground Wall	Underground Floor
Underground Wall Height	2.44m (deep basement)	-
Construction	2.44m, R-10 interior, concrete	-
Conduction Factor(F <sup>2</sup> )	0.78	-
Effective R (m <sup>2</sup> ·K/W)	3.69	176.1
Effective U (W/m <sup>2</sup> ·K)	0.273	0.006
Exposed parameter(Pexp)	-	0

### 3.2 HVAC 시스템 모델

건물의 공조시스템은 대부분 이중덕트 가변풍량 시스템으로 구성되어 있으며, 지하층은 가변풍량과 정풍량시스템이 각 실의용도 및 열적특성을 고려하여 배치되었다. 공조시스템의 운전조건은 모니터링데이터와 건물운영자의 인터뷰를 통하여 작성하였다.

Table 5는 대상건물의 공조시스템에 대한 시뮬레이션 설정조건을 나타내고 있다. 가변풍량시스

Table 5 System conditions for the typical AHU(DDVAV)

Items	System Conditions
HEAT-TEMP-SCHEDULE	21.7 °C
COOL-TEMP-SCHEDULE	21.7 °C
THERMOSTAT-TYPE	Reverse-Action
SYSTEM TYPE	DDVAV
RETURN-AIR-PATH	PLENUM
MIN-CFM-RATIO	0.6
MIN-OUTSIDE-AIR	0.1
MIN-SUPPLY-TEMP	12.8 °C
COOL-SET-TEMP	12.8 °C
MAX-SUPPLY-TEMP	35 °C/24 °C
HEAT-SET-TEMP	41 °C
PREHEAT-TEMP	10 °C
MOTOR-PLACEMENT	IN-AIRFLOW
FAN-CONTROL	SPEED
SUPPLY-MECH-EFF	0.51

템에 대한 최소환기량은 공급풍량의 60%로 설정하고 외기도입량은 공급풍량의 10%로 설정하였다. 대상건물의 배기 및 덕트에 의한 열손실은 30%를 설정하였는데, 이중에서 20%는 덕트의 누기로 인한 손실과 지하층 인쇄소에서 국부적으로 배출하는 배기손실을 포함하고 있으며, 나머지 10%는 계단실을 포함한 건물 전체의 배기손실로 간주하였다. 난방코일의 송풍공기 온도는 각각 35 °C와 24 °C로 설정하였는데, 이는 대상건물의 운전자가 본 연구를 위한 모니터링 기간에 난방에너지 절약의 목적으로 여름철에 보일러의 공급온수의 온도를 낮추었기 때문이다.

Table 6은 대상건물에 설치된 주요 열원시스템의 종류 및 효율에 대한 DOE-2 시뮬레이션 입력 값을 나타내고 있다. DOE-2 프로그램에서는 보일러의 효율을 용량에 대한 열원입력비율(Heat Input Ratio)로 정의하고 있으며, 대상건물의 보일러는 보일러 제조사의 시방서를 바탕으로 정상상태의 운전조건에서 1.19 HIR 값을 설정하였다. 또한, 냉동기의 효율은 냉동기 용량에 대한 전기사용비율(Electric Input Ratio)로써 정의하고 있다. 대상 건물에 설치된 냉동기의 효율은 실제 모니터링데이터를 활용하여 산출하였으며, 정상상태의 운전조건에서 0.1547 EIR 값을 나타내었다. 산출된 EIR 값은 냉동기의 성적계수(COP) 6.59에 해당한다. 냉각탑의 효율(EIR)은 제조사의 냉각탑 시방서를 참고하여 팬의 용량과 유량의 비율로 결정하였으며 0.00455 EIR로 설정하였다.

Table 6 Plant Conditions

Items	Plant Conditions
BOILER	HW Boiler
SIZE	4.4 GJ
INSTALL NUMBER	2
HW-BOILER-HIR	1.19
CHILLER	HERM-CENT-CHLR
SIZE	5.89 GJ(465 TON)
INSTALL NUMBER	2
ELEC-INPUT-RATIO	0.1547(6.59 COP)
COOLING TOWER	OPEN-TWR
SIZE	12.66 GJ(1000 TON)
INSTALL NUMBER	2
ELEC-INPUT-RATIO	0.00455

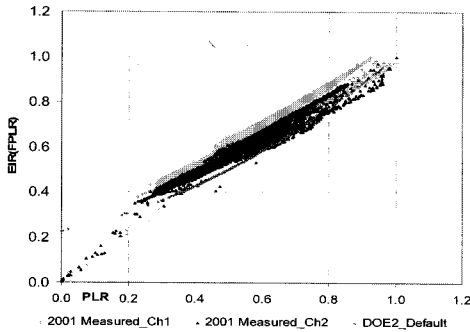


Fig. 10 Comparison of chiller efficiency under part load conditions between measured and DOE-2 default.

한편, DOE-2 프로그램은 부분부하 조건에서의 시스템의 운전효율을 계산하기 위하여 다양한 열원시스템의 유형별 성능곡선을 포함하고 있다. 따라서 사용자는 DOE-2의 성능곡선을 사용하거나 실측데이터를 바탕으로 별도의 성능곡선을 작성하여 입력할 수도 있다. 본 연구에서는 대상건물의 냉동기의 모니터링데이터와 DOE-2 프로그램의 성능곡선과 비교한 결과, Fig. 10과 같이 거의 유사한 형태를 나타내고 있다. 따라서 부분부하 조건에서 대상건물의 냉동기의 효율은 DOE-2 프로그램에서 제공하는 성능곡선을 사용하였다.

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 시뮬레이션 모델의 보정결과

본 연구는 시뮬레이션 모델의 보정을 위하여 냉/난방 및 전기에너지의 모니터링데이터를 시뮬레이션 결과와 비교하였으며, 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성은 통계적인 방법과 그래픽적인 방법을 사용하여 평가하였다.

시뮬레이션 모델의 보정 및 검증을 위하여 사용한 통계적 방법은 CV(RMSE) (Coefficient of variation of the root mean square error)와 MBE (mean bias error)이다.<sup>(10)</sup> CV(RMSE)와 MBE는 건물의 에너지성능평가를 위한 시뮬레이션의 타당성을 검증하기 위하여 주로 사용하는 통계적 기법으로 측정값과 예측치의 오차를 평가할 수 있다. ASHRAE Guideline 14에 의하면 전체건물에 대한 시뮬레이션인 경우 CV(RMSE)와 MBE 값이 30% 이내이면 모델이 보정되었다고 판단하고 있다.<sup>(11)</sup>

본 연구에서는 대상건물의 냉방, 난방, 그리고 전기에너지의 사용량에 대한 CV(RMSE)와 MBE를 아래의 식(4)와 식(5)를 이용하여 계산하였다.

$$CV(RMSE) = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{pred,i} - Y_{data,i})^2}{n-p}}}{Y_{data}} * 100 \quad (4)$$

$$MBE = \frac{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{pred,i} - Y_{data,i})}{n-p}}{Y_{data}} * 100 \quad (5)$$

여기서,  $Y_{data,i}$ 는 모니터링데이터 값을 나타내며,  $Y_{pred,i}$ 는 시뮬레이션의 예측 값을 의미하고  $Y_{data}$ 는 모니터링데이터의 평균값을 나타내고 있다.  $n$ 는 통계분석에 사용된 전체데이터의 수를, 그리고  $p$ 는 독립변수의 수를 표시한다. 본 연구의 통계처리를 위하여 사용된 데이터는 시뮬레이션 기간과 동일한 1년 8760시간의 데이터를 일평균으로 환산하여 사용하였다. 대상건물의 시뮬레이션 모델은 단계적인 보정과정<sup>(12)</sup> 거쳐 최종적으로 20.38% CV(RMSE)와 0.63% MBE 값을 도출하였으며, 결과적으로 허용 오차의 범위 내에서 본 연구를 위한 모델은 보정되었다.

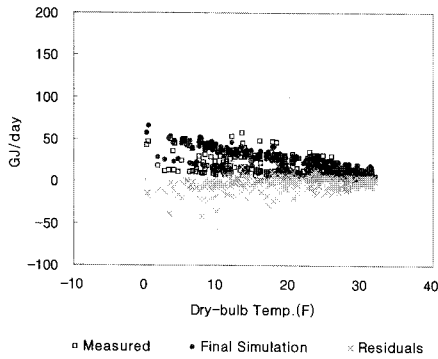
한편, Fig. 11(a), Fig. 11(b), Fig. 11(c)는 시뮬레이션의 최종적인 보정결과를 외기온의 변화에 따라 보여주고 있으며, 각각 전체건물의 일평균 난방에너지와 냉방에너지, 그리고 전기사용량으로 구분하여 모니터링데이터와 비교하여 나타내고 있다. 난방의 경우 에너지 사용량이 두 개의 그룹으로 나누어지는 데, 이것은 모니터링기간 동안에 건물의 운전자가 에너지절약을 목적으로 보일러의 공급온수의 온도를 조정함에 따라 공조기의 난방코일의 온도 및 송풍공기의 온도가 변화되었기 때문이다. 냉방에너지의 경우 외기온이 10℃에서 20℃의 구간을 제외하고 거의 일치하고 있다. 전기 사용량은 시뮬레이션 결과 값이 전체적으로 약간 높게 나타나고 있으나 오차의 허용치 범위 내에 있다고 판단된다.

### 4.2 건물에너지 성능 평가

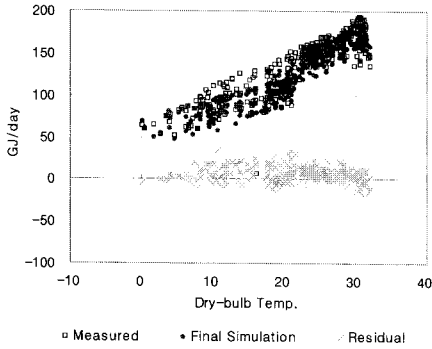
#### 4.2.1 건물에너지 원단위 평가

본 연구에서는 일차적으로 대상건물의 전체에

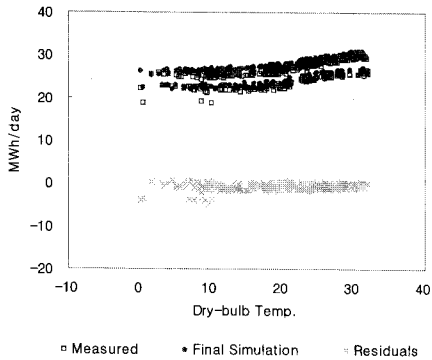




(a) Whole-building heating energy use



(b) Whole-building cooling energy use



(c) Whole-building electricity use

Fig. 11 Whole-building heating, cooling, and electricity use against dry-bulb temperature.

너지성능을 상대적으로 비교하기 위하여 대상건물의 인접지역에 위치한 유사한 규모의 사무소건물의 에너지원단위를 비교하였다. Fig. 12에 나타나 있듯이 대상건물(No. 1)의 전체에너지 성능은 인접건물(No. 3와 No. 6)의 총 에너지 사용량과 비교하여 중간 정도에 위치하고 있다. 하지만, 대상

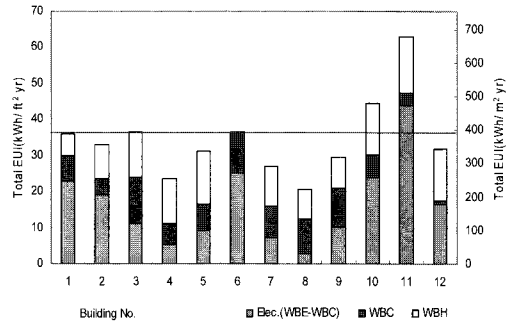


Fig. 12 Total EUI with sub-metered data.

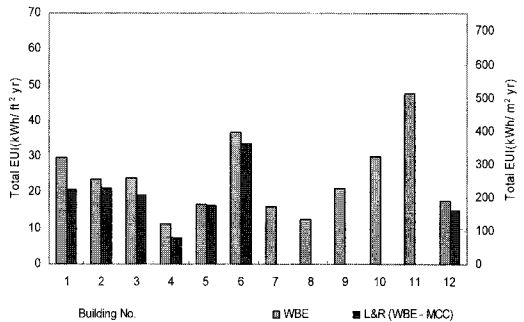


Fig. 13 Comparison of L&R (WBE-MCC) electricity EUI for similar buildings.

건물의 원단위를 냉방, 난방, 그리고 조명 및 기기의 전기 사용량으로 구분하여 비교하면 각각의 에너지소비형태가 다름을 알 수 있다. Fig. 13은 전체 전기사용량과 조명 및 기기의 에너지사용량을 비교하고 있다. 대상건물(No. 1)과 조명 및 기기의 전기사용량이 유사한 인접건물(No. 2와 No. 3)을 비교하여 보면 대상건물의 총 전기사용량이 상대적으로 높게 나타나고 있다. 이것은 대상건물의 지하층에 위치한 인쇄소의 출판 장비들의 전기사용량에 기인한 것으로 판단된다.

결론적으로, 건물의 원단위를 냉/난방과 기기의 전기사용량으로 구분하여 비교함으로써 에너지소비 형태를 용이하게 파악할 수 있는 장점이 있지만 다양한 건물 및 시스템 요소들의 상호관련성을 구체적으로 분석하기는 어려움이 있다. 따라서 본 연구에서는 모니터링데이터를 활용하여 시뮬레이션 모델을 보정하고, 이를 바탕으로 작성된 기준모델(base-case)과 비교하여 대상건물의 전체에너지성능 및 적용된 설계요소의 에너지절약 효과를 분석하였다.

4.2.2 건물에너지 절약요소 평가

본 연구에서는 대상건물에 적용된 에너지절약 설계요소의 성능을 평가하기 위하여, 보정된 시뮬레이션(as-built) 모델에 포함된 에너지절약 설계요소를 기준모델(base-case)의 요소와 개별적으로 교체한 후 단계적으로 시뮬레이션을 수행하였다. 기준모델은 대상건물과 건물의 형태와 운전 조건이 동일하며 개별적인 설계요소의 종류와 효율만 ASHRAE Standard 90.1-1989의 성능기준을 참고하여 작성하였다. Table 7은 본 연구에서 평가한 에너지절약 설계요소의 종류 및 효율을 기준모델과 비교하여 보여주고 있다.

Table 7 ECDMs studied for as-built and base-case simulations

No.	ECDMs	As-built	Base-case	Remarks
1	High efficient boiler	1.19 HIR	1.33 HIR	Heat Input Ratio(HIR)
2	High efficiency chillers	0.1547 EIR (6.59 COP)	0.2147 EIR (4.6 COP)	Electric Input Ratio(EIR)
3	Over-sized cooling tower	12.66 GJ	10.23 GJ	Base-case (Auto-sized)
4	Cooling Pump	15.25 m	21.35 m	Head
	Heating Pump	10.68 m	18.3 m	Head
5	Air foil type fans	VFD	Inlet	Fan Type
6	Dual Duct VAV system	DDVAV	DDCAV	AHU type
7	Low-E Window	Low-e	Single Bronze	Glazing Type

Table 8과 Fig. 14는 대상건물에 대한 단계적인 시뮬레이션 결과를 나타내고 있으며, 전체건물에너지 성능의 관점에서 에너지절약 설계요소들에 대한 상대적인 절약효과를 보여주고 있다. 결과적으로, 모든 에너지절약 설계요소가 적용된 대상건물(As-built)의 전체에너지성능(43,429 GJ)은 기준모델(base-case)의 전체에너지성능(81,500 GJ)과 비교하여 46.7%(38,070 GJ) 효율적인 것으로 평가 되었으며, 이를 대상건물을 기준으로 보면 87.7%의 에너지절약 효과에 해당한다. 또한, 적용된 에너지절약 설계요소들 중에서 이중덕트 가변풍량 시스템(34.1%)과 Low-e 유리(30.6%)가 대상건물의 전체에너지 성능에 가장 영향을 주는 설계요소로 평가 되었으며, 냉동기(5.5%), 가변팬(2.5%), 보일러(2.4%), 그리고 펌프(1%) 순으로 에너지절약 효과가 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

본 연구에서는 미국의 Austin, Texas에 위치한 주정부 사무소용 건물을 대상으로 건물에너지 모니터링 및 DOE-2 시뮬레이션을 활용하여 신축 건물의 에너지성능평가를 수행하였으며, 이를 통하여 다음과 같은 결론을 사례연구를 통하여 검증하였다.

(1) 건물에너지 시뮬레이션에서 주요 오차원인으로 판단되는 기기의 효율 및 성능, 운전 조건, 그리고 각종 스케줄에 대한 정보를 모니터링데이

Table 8 End-use energy consumption for each ECDMs

Category	Model	Energy Conservation Design Measures(ECDMs) (GJ)							Base-case	
		As-built	Boiler	Chiller	Tower	Pump	Fan	AHU		Window
AREA LIGHTS		7695	7695	7695	7695	7695	7695	7695	7695	7695
MISC EQUIPMT		8924	8924	8924	8924	8924	8924	8924	8924	8924
SPACE HEAT		9068	10091	9068	9068	9050	8636	16175	18474	31163
SPACE COOL		7026	7026	9409	7044	7068	7171	8645	8462	10698
HEAT REJECT		393	393	395	386	395	404	482	460	400
PUMPS & MISC		840	840	840	840	1229	840	844	864	1382
VENT FANS		7063	7063	7063	7063	7063	8434	13032	9401	18818
DOMHOT WATER		121	121	121	121	121	121	121	121	121
EXT LIGHTS		2296	2296	2296	2296	2296	2296	2296	2296	2296
Total(GJ)		43429	44452	45815	43441	43845	44524	58217	56701	81500
Total(MJ/m2-yr)		1438	1472	1517	1438	1452	1474	1928	1877	2699

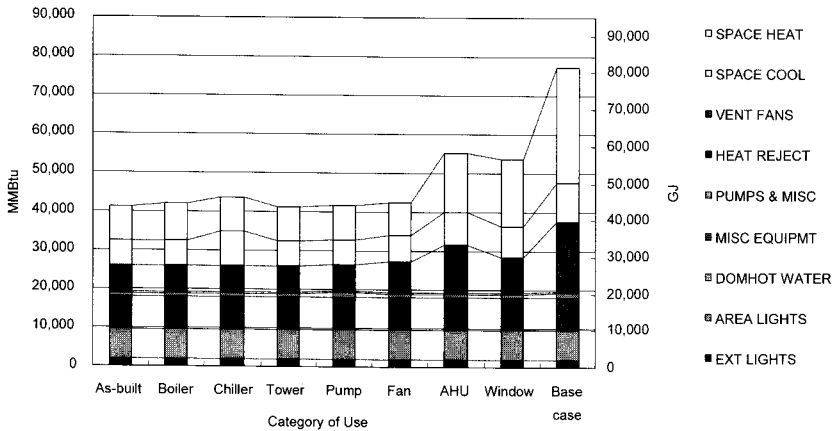


Fig. 14 Annual energy end-use for each ECDM.

터를 사용하여 입력 자료로 활용함으로써 모델의 타당성 및 결과의 신뢰성을 얻을 수 있다.

(2) 건물의 에너지성능을 1차적으로 평가하기 위하여 주로 사용되는 건물의 에너지원단위를 냉/난방 및 기기의 전기사용량으로 구분하고, 이를 비교함으로써 에너지소비특성을 상대적으로 파악할 수 있다. 하지만 다양한 건물 및 시스템 요소들의 상호관련성을 구체적으로 분석하기에는 어려움이 있다.

(3) 신축건물의 에너지성능은 모니터링데이터에 의해 보정된 시뮬레이션을 활용함으로써 전체 건물에너지의 성능뿐 만 아니라 적용된 에너지절약 설계요소들이 실제로 어느 정도의 에너지절약 효과가 있는지 정량적으로 평가할 수 있다.

### 후 기

본 연구는 저자가 미국 Texas A&M의 Energy Systems Laboratory(ESL)에서 학위논문을 위하여 수행한 연구내용의 일부를 발췌하여 요약한 것임.

### 참고문헌

1. IPMVP, 2001, International performance monitoring and verification protocol, Volume I : Concept and options for determining energy and water savings, Washington, United States Department of Energy.
2. IPMVP, 2003, International performance monitoring and verification protocol, Volume III :

Concept and practices for determining energy savings in new construction, Washington, United States Department of Energy.

3. Torcellini, P., Judkoff, A. R. and Crawley, D. B., 2004, Lessons learned : High-performance buildings, ASHRAE Journal, Vol. 46, No. 9, pp. S4-S11.
4. Eley, C. and Tathagat. T., 1998, Energy Analysis Report : R. E. Johnson State Office Building, Texas State Energy Conservation Office, Austin, Texas.
5. Song, S., 2006, Development of new methodologies for evaluating the energy performance of new commercial buildings, Ph.D. thesis, Texas A&M University, College Station, TX.
6. Haberl, J. S. and Bou-Saada, T. E., 1998, Procedures for calibrating hourly simulation models to measured building energy and environmental data, Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 120, pp. 193-204.
7. Abushakra, B., Sreshthaputra, A., Haberl, J. S. and Claridge, D. E., 2001, Compliance of diversity factors and schedules for energy and cooling load calculations, Energy System Laboratory Report No. ESL-TR-01/04-01, College Station : Texas A&M University.
8. LBNL, 1993, DOE-2.1E supplement manual, Berkeley, CA : Lawrence Berkeley National Laboratory.
9. Winkelmann, F. C., 1998, Underground surfaces : How to get a better underground surface

- heat transfer calculation in DOE-2.1e, Building Energy Simulation User News, Vol. 19, No. 1, pp. 17-25.
10. Kreider, J. and Haberl, J. S., 1994, Predicting hourly building energy usage : The great energy predictor shootout-overview and discussion of results. ASHRAE Transactions, Vol. 100, No. 2, pp. 1104-1118.
  11. ASHRAE, 2002, ASHRAE Guideline14 : Measurement of energy and demand savings, Atlanta, GA : American Society of Heating, Refrigerating, and Air-Conditioning Engineers.
  12. Song, S. and Haberl, J. S., 2007, A procedure for the performance evaluation of a new commercial building : Part I-Calibrated as-built simulation, ASHRAE Transactions (Accepted in Dec. 2007).
  13. Song, S. and Haberl, J. S., 2008, A procedure for the performance evaluation of a new commercial building : Part II-Overall Methodology and Comparison of Methods, ASHRAE Transactions (Accepted in Mar. 2008).