Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering
Vol. 26, No. 8 (2014), pp.394-400
http://dx.doi.org/10.6110/KJACR.2014.26.8.394

Inverse Model Toolkit을 이용한 리모델링 건축물의 에너지 성능평가 사례

A Case Study on Energy Performance Analysis of Retrofitted Building Using Inverse Model Toolkit

권경우(Kyung-Woo Kwon)[1†], **이석주**(Suk-Joo Lee)[1], **박준석**(Jun-Seok Park)[2]
[1]한양대학교 대학원 건축공학과, [2]한양대학교 건축공학과
[1]*Graduate School of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea*
[2]*Department of Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-070, Korea*

(Received June 19, 2014; revision received June 30, 2014; Accepted: July 3, 2014)

Abstract Several models and methods have been developed to verify the improvement of energy performance in retrofit buildings. The verification is important to confirm the effectiveness of new technologies or retrofits. Inverse model toolkit proposed by ASHRAE evaluates the changes of the energy performance of retrofit buildings by using actual energy consumption data. In this study, the inverse model toolkit was used to analyze heating and cooling energy performance of an office building. Analyzed coefficients of correlation of actual energy consumption with estimated energy consumption was above 0.92 and well fitted. It was confirmed that energy consumption of natural gas decreased by 43.4% and also that electricity decreased by 13.8%, after the retrofit of the case building. For the energy usage, cooling energy was increased by 7.4%, heating energy was decreased by 42.3%, hot water and cooking were increased by 3.4%, lighting and electronics were decreased by 19.3%, and the total energy was decreased by 18.9%.

Key words Energy Consumption(에너지 소비), Energy Performance(에너지 성능), Retrofit(리모델링), Case Study(사례분석), Inverse Model Toolkit

† Corresponding author, E-mail: *prewill@daelim.co.kr*

1. 서 론

최근 건축물의 온실가스 배출량 저감을 위해 정부에서는 신축건축물을 중심으로 건축물 에너지 관련 기준을 강화하고, 에너지효율등급 기준을 제정하는 등의 정책적 노력을 기울여왔다. 국가통계에 따르면 2013년 현재 전국의 건축물은 6,851,802동이며,(1) 2013년 착공기준 신축 건축물은 9,687개 리모델링(증축, 개축, 이전, 대수선) 건물은 4,165개로 전체 건축물 대비 각각 0.14%, 0.06%에 불과하다.(2) 따라서 건축물의 에너지 절감 정책이 실효성이 거두기 위해서는 기존 건물의 에너지 리모델링을 활성화할 필요가 있다.

정부에서는 최근 그린리모델링 관련 기관을 신설하고 시범사업을 실시하고 있다. 그린리모델링 사업이 성공적으로 수행되고 민간부문에 까지 활성화되기 위해서는 에너지 절감을 위한 요소기술 개발뿐만 아니라 리모델링을 통한 에너지 절감효과에 대한 정량적인 평가방법의 개발이 선행되어야 한다. 리모델링의 성능개선효과를 평가하는 방법은 크게 시뮬레이션을 이용한 방법과 실제 에너지 사용량 데이터를 분석하는 방법이 있으나 시뮬레이션 결과의 경우, 실제 사용량 데이터와 상당한 차이를 나타내는 경우가 많아 그 한계점이 분명히 존재한다.(3) 실사용량을 이용한 평가 방법에서는 현재 대부분의 건물이 용도별 에너지 모니터링이 되고 있지 않은 상황에서 단순히 리모델링 전후의 에너지 사용량 비교를 통하여 그 효과성을 평가하고 있다. 하지만 이러한 비교방법은 기후조건의 변화, 용도별 에너지 사용량을 분석하지 못해 신뢰도 있는 평가방법으로 사용될 수 없다.

미국공조냉동학회(ASHRAE)에서는 2002년 실사용량을 기반으로 한 건축물의 에너지 절감량 평가 방법인 Inverse Model Toolkit(이하 IMT)을 개발하여 적용하고 있다.(4) 본 연구에서는 대형 오피스 건축물의 리모델링 사례에 IMT를 적용하여 리모델링 건축물의 에너지 성능개선 효과를 정량적으로 분석하였다.

ⓒ SAREK

2. Inverse Model Toolkit 개요

2.1 선행연구

Inverse Model Toolkit은 건축물의 실제 에너지 사용량을 바탕으로 건물의 성능을 진단하고 평가하는 역해석(Inverse Analysis)의 한 방법이다. Fig. 1에서는 IMT에 포함된 다양한 모델들의 역사를 보여준다.[5] 1980년대 Goldber[6]와 Fels[7]는 주거용 건물의 에너지 절감량 측정을 위해 PRISM(Princeton Scorekeeping Method) Method를 개발하였다.[6-8] 이 방법은 월별 에너지 사용량의 외기온도에 의한 영향을 배제하기 Variable-Based Degree Day Method(VBDD)를 사용하여 에너지 사용량과 Degree Day의 관계를 회귀분석을 통하여 해석하였다. 초기 주거용 건축물에 주로 적용되었던 PRISM은 상업용 건물에서 적용되지 않는 문제점이 발견되어 Schrock and Claridge,[9] Ruch and Claridge[10]은 4 Parameter Change Point Model을 제안하였다.[9, 10] Kissock(1993)은 수치해석을 이용해 그동안 제안된 모델들의 최적점을 찾는 알고리즘인 EModel을 개발하였다.[11-13] Rabl and Rialha,[16] Ruch,[5] Sonderegger(1997, 1998)는 외기온도 이외의 변수를 반영하기 위해 Multi-Variable Regression(MVR) 모델을 적용한 CP-MVR, VBDD-MVR을 제안하였다.[14-18] Kissock은

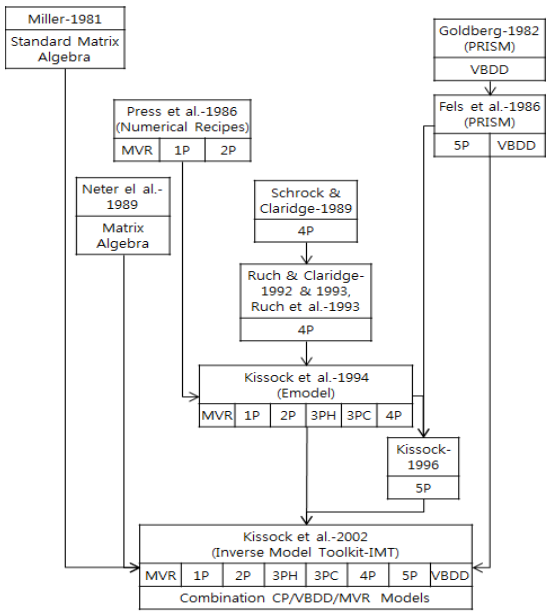
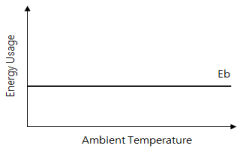
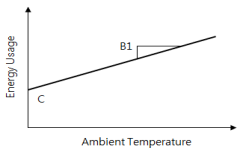
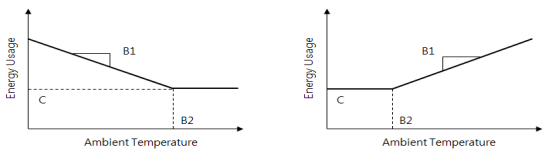
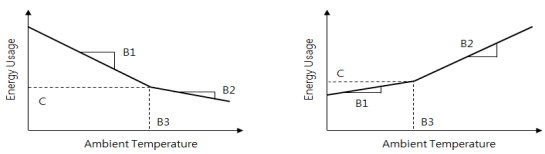
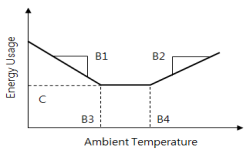


Fig. 1 History diagram of the inverse model toolkit.[5]

기존의 연구결과들을 바탕으로 2002년 ASHRAE의 연구프로젝트인 1050-RP를 통해 IMT로 발전시켰다.[19]

Table 1 Single-variate models for modeling energy use in buildings(5)

Model	Graph	Equation
1 Parameter Model		$E = E_b$
2 Parameter Model		$E = C + B_1(T)^+$
3 Parameter Model (Heating, Cooling)		$E = C + B_1(B_2 - T)^+$ $E = C + B_1(T - B_2)^+$
4 Parameter Model (Heating, Cooling)		$E = C + B_1(B_3 - T)^+ - B_2(T - B_3)^+$ $E = C - B_1(B_3 - T)^+ + B_2(T - B_3)^+$
5 Parameter Model		$E = C + B_1(B_3 - T)^+ - B_2(T - B_4)^+$

2.2 Change Point Model

본 연구에서 사용한 IMT의 모델은 Change point 모델로 Table 1과 같다. Change point 모델은 월평균 외기온도와 에너지 사용량 간의 상관관계를 통계적으로 분석하는 방법으로 1개에서 5개의 파라미터를 가지는 모델로 세분화된다. Table 1의 1P 모델은 외기온에 상관없이 연중 일정한 사용량을 나타내는 경우로 대표적으로 지역냉난방을 사용하는 건물의 전기사용량을 들 수 있다. 2P 모델은 외기온이 증가함에 따라 에너지 사용량이 증가하는 냉방위주의 건물에 적용된다. 3P 모델의 첫 번째 그래프는 일정한 수준의 에너지를 사용하다가 외기온도가 특정온도 이하에 도달하면 에너지 사용량이 증가하는 건물로 난방에너지의 사용특성을, 두 번째 그래프는 첫 번째 그래프의 반대의 경우로 냉방에너지 사용특성을 나타낸다. 이때 C값은 외기온도의 변화와 무관하게 사용되는 기저에너지 값으로 볼 수 있으며 에너지원이 전기일 경우 조명, 전기기기 사용량으로, 가스의 경우에는 급탕, 취사 사용량으로 볼 수 있다. 4P 모델은 외기온에 따라 기저사용량이 변화하거나 VAV 시스템을 적용한 건물에서 나타날 수 있다. 5P 모델은 1개의 에너지원이 냉난방으로 사용되는 경우로 난방기울기 B1, 냉방기울기 B2, 난방시작온도 B3, 냉방시작온도 B4, 기본사용량 C, 총 5개의 파라미터를 가진다.

3. 연구 방법

3.1 분석대상 건물

분석대상 건축물은 서울에 위치한 대형 오피스 건물로 2008년 1월 리모델링 공사를 착공하여 2011년 4월 완공하였으며 리모델링 공사는 재실 중에 실시되었다. 건축물의 개요 및 리모델링 전후의 주요 변경사항은 Table 2와 같으며 대상건물의 기준층 평면은 Fig. 2와 같다.

건축부문에서는 남북측면의 창호 설치, 단판유리에서 로이 복층유리로의 교체, 단열성능 강화 등이 있었으며,

Table 2 Summary of the case building

Category	Before Retrofit	After Retrofit
Number of stories	Floor above ground : 24 Floor below ground : 4	
Total floor Area	94,810 ㎡	94,634 ㎡
Exterior	T6 Single glass PC panel+Tile	T24 Low-e pair glass PC panel+Tile
Cooling equipment	Turbo refrigerator Absorption refrigerator (Total 3,020 USRT)	Turbo refrigerator Ice thermal storage (Total 3,400 USRT)
Heating equipment	Large size boiler (3 EA, 21 Ton)	Medium size boiler (8 EA, 16 Ton)
Type of air conditioning	AHU(CAV)+FCU	

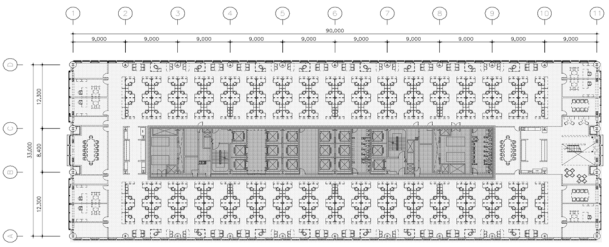


Fig. 2 Typical floor plan of the case building.

설비에서는 흡수식냉온수기의 철거, 빙축열시스템 설치, 냉방장비용량 증대, 대형보일러 3대에서 중형보일러 8대로 교체되었다. 전기공사에서는 기존에 운영되던 전산센터를 타 건물로 이전하고 조명기구의 효율향상 및 중앙제어를 적용하였다. 분석에 사용된 에너지 사용량 데이터는 분석대상건물의 월별 전체 에너지 사용량으로 전기와 가스로 구분되어 있으며 2003년 1월부터 2012년 9월까지의 사용량이다. 가스 사용량은 진발열량 9,400 kcal/Nm³을 적용하여 단위를 환산하였다. Fig. 3은 리모델링 기간 및 리모델링 전후의 월별에너지 사용량을 나타낸다.

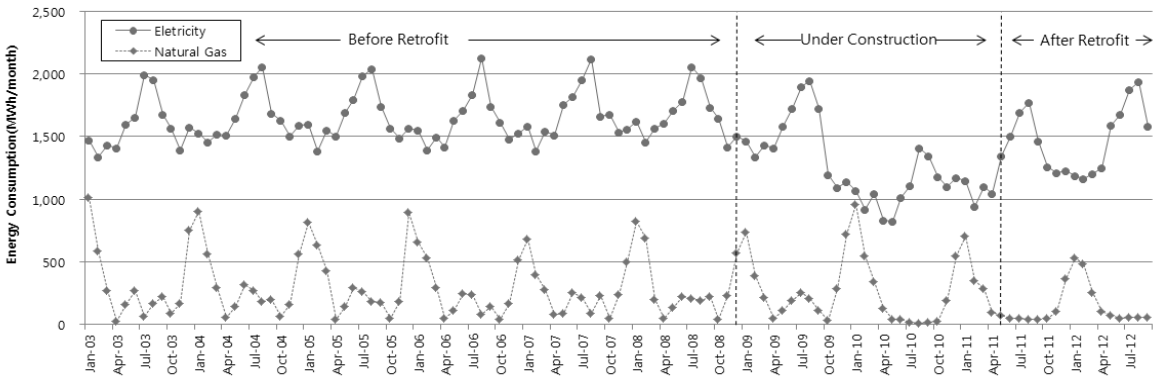


Fig. 3 Energy consumption data of the case building.

ⓒ SAREK

3.2 분석 방법

에너지 사용량 분석 방법은 Fig. 4와 같다. 분석대상 건물의 월별 에너지 사용량 데이터와 기상데이터를 리모델링 전후로 구분하고, IMT Change Point Model에 적용하여 회귀분석을 실시하였다.

회귀분석은 C언어로 프로그래밍하여 수행하였다. 분석 알고리즘은 x축에 월평균 외기온도, y축에 에너지 사용량 데이터를 입력하고 3P, 4P, 5P 각 모델의 Change Point를 x축의 최소값에서 부터 최대값까지 △x만큼 움직이면서 입력한다. 이때 Change Point를 기준으로 좌우측의 데이터의 기울기를 최소자승법을 이용해 구하고 전체 데이터의 상관관계를 기록하여, 최종적으로 상관관계가 가장 높은 파라미터를 출력한다. 이렇게 도출된 파라미터는 특정 외기온에서의 에너지 사용량을 추정하는데 사용되는데 표준기상데이터에 파라미터를 적용하여 월별에너지 사용량 및 용도별에너지 사용량을 추정한다. 표준기상데이터를 적용은 리모델링 전후의 외기온도에 따른 에너지 사용량 차이를 배제하고 동일한 기온조건에서의 에너지 사용을 비교하게 한다.

용도별 에너지 사용량은 동절기 증가분은 난방, 하절기 증가분은 냉방, 가스의 기본 사용량은 취사와 급탕, 전기의 기본사용량은 조명과 전기기기 사용량으로 가정하였다. 표준기상데이터는 Meteonorm社의 서울기상데이터를 적용하였으며 Table 3과 같다.

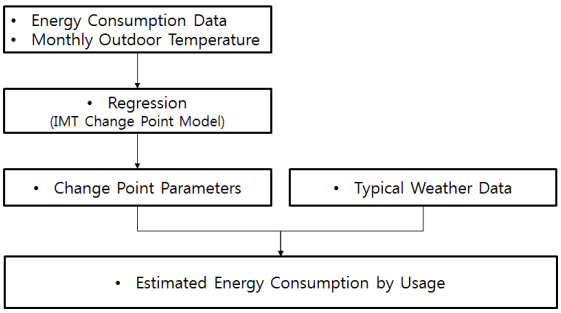


Fig. 4 Analysis Process.

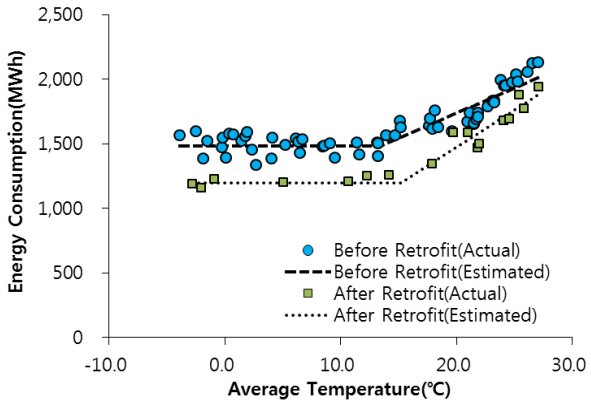
Table 3 Typical weather data of seoul

Month	Average Temperature(℃)
Jan	-3.3
Feb	-1.3
Mar	4.5
Apr	11.7
May	17.5
Jun	21.2
Jul	24.6
Aug	25.4
Sep	20.3
Oct	14.3
Nov	6.6
Dec	-0.3

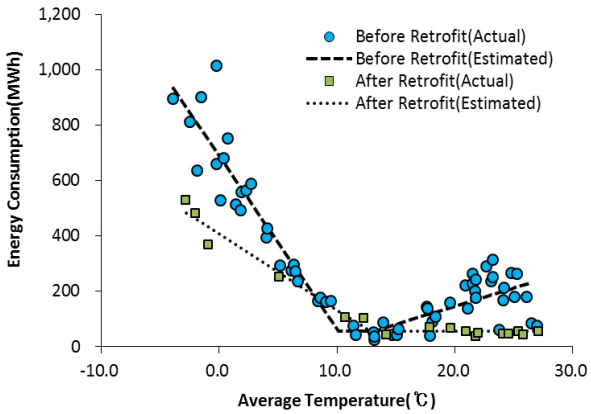
4. 분석 결과

4.1 회귀분석 결과

IMT를 이용한 에너지 사용량 분석결과는 Fig. 5과 Table 4에 나타낸다. Fig. 5는 리모델링 전후의 전기, 가스의 에너지사용량을 외기온도에 따라 회귀분석한 결과를 나타낸다. 전기사용량은 3P cooling 모델로 리모델링 전후가 동일하였으나, 가스사용량은 리모델링 전 5P 모델, 리모델링 후에는 3P Heating 모델로 분석되었다. 이는 리모델링 전에는 가스를 이용한 흡수식 냉동기를 사용했으나, 리모델링 후 흡수식 냉동기를 전기를 사용하는 빙축열 냉동기로 전환하였기 때문으로 판단된다. 각 모델의 파라미터 값은 Table 4에 표시하였으며 분석결과의 상관계수 R^2 값은 모두 0.92 이상으로 양호한 값을 나타내었다.



(a) Electricity



(b) Natural Gas

Fig. 5 Changes of energy consumption after the retrofit.

Table 4 The regressed IMT model parameters

Case	Energy Source	Heating Change Point (℃)	Cooling Change Point (℃)	Heating Slope (MWh/℃)	Cooling Slope (MWh/℃)	Base (MWh)	R^2
Before Retrofit	Natural Gas	10.1	13.1	62.7	13.2	54.5	0.939
	Electricity	-	13.5	-	38.7	1485.2	0.925
After Retrofit	Natural Gas	12.8	-	27.3	-	56.4	0.978
	Electricity	-	15.2		57.6	1198.3	0.941

가스사용량에서 난방에너지 기울기는 리모델링 후에 현저히 낮아진 것을 확인할 수 있으며, 기본 사용량은 거의 변호가 없는 것으로 나타났다. 난방시작온도(Heating Change Point)는 리모델링 후 다소 높아졌다. 전기사용량의 경우, 기본 사용량이 리모델링 후에 감소하였으나 냉방기울기는 오히려 상승한 것으로 나타났다. 기본사용량의 감소는 리모델링 전에 운영되던 전산센터가 타 건물로 이전하고, 조명기기의 효율화 및 중앙제어를 적용하였기 때문으로 판단된다. 냉방기울기의 증가는 리모델링 후 흡수식 냉동기를 철거하여 전기 냉열원의 사용량이 증가하였기 때문으로 판단되며, 냉방시작온도(Cooling Change Point)는 리모델링 후에 다소 낮아진 것을 확인할 수 있다.

4.2 에너지원별 분석

회귀식과 표준기상데이터를 이용하여 에너지원별 사용량을 추정한 값은 Table 5와 같다. 가스 사용량은 리모델링 전, 후 각각 4,032 MWh에서 2,285 MWh로 43.3% 절감 되었으며, 전기 사용량은 리모델링 전 19,470 MWh, 리모델링 후 16,787 MWh로 13.8% 절감 되었다.

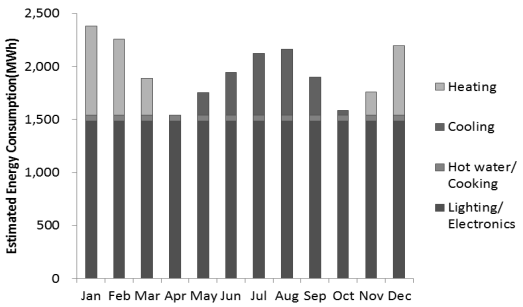
4.3 용도별 에너지 분석

Change Point Parameter를 이용하여 표준기상조건에서의 용도별 에너지 사용량을 분석한 결과는 Fig. 6과 같다. 에너지용도별 구분은 동절기 에너지 사용량 증가분은 난방으로, 하절기 에너지 사용량 증가분은 냉방으로 계산하였으며 가스의 기본사용량은 급탕과 취사 사용량으로, 전기의 기본사용량은 조명과 일반전기 사용량으로 가정하였다.

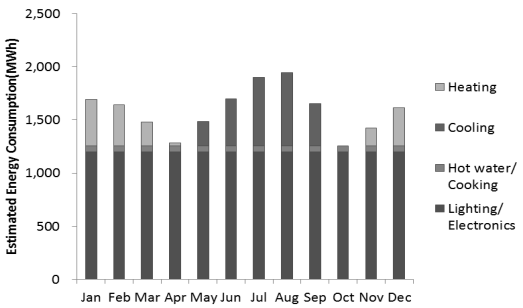
Table 6, Fig. 7에서는 리모델링 전후의 에너지 연간 사용량을 비교하였다. 리모델링 전후의 전체 에너지 사용량은 각각 23,501 MWh, 19,072 MWh로 18.9% 절감되었다. 세부 용도별로는 냉방에너지는 7.4% 증가, 난방에너지는 42.3% 감소, 급탕과 취사에너지는 3.4% 증가, 조명과 일반전기는 19.3% 감소되었다. 효율이 낮은 흡수식 냉동기를 철거하였음에도 냉방에너지 소비량이 다소 증가한 것은 단열과 창호의 외피성능 향상으로 하절기와 중간기의 자연냉각 효과가 감소되었기 때문으로 판단된다. 전체 에너지 사용량 중 냉난방에너지 부분의 에너지 절감량을 별도로 산정하면 5,026 MWh에서 4,016 MWh로 20.1% 절감되었다.

Table 5 Estimated energy saving by source

Energy Source	Before Retrofit (MWh)	After Retrofit (MWh)	Saving
Natural Gas	4,032	2,285	-43.3%
Electricity	19,470	16,787	-13.8%



(a) Before Retrofit



(b) After Retrofit

Fig. 6 Monthly energy consumption after the retrofit.

Table 6 Changes of yearly energy consumption after the retrofit

Usage	Before Retrofit (MWh)	After Retrofit (MWh)	Saving
Cooling	2,241	2,407	7.4%
Heating	2,785	1,608	-42.3%
Hot water/Cooking	654	677	3.4%
Lighting/Electronics	17,822	14,379	-19.3%
Total	23,502	19,072	-18.9%

ⓒ SAREK

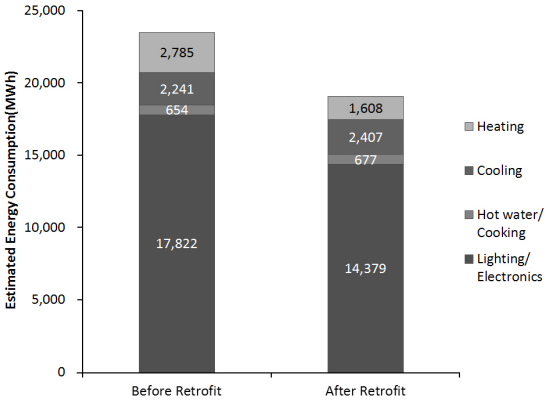


Fig. 7 Changes of yearly energy consumption after the retrofit.

5. 결 론

본 연구에서는 총량에너지 사용량을 단순 비교하는 기존의 평가 방법에서 에너지 사용량 측정기간, 외기에 의한 영향을 배제하고 에너지 용도별 사용량을 추정하는 IMT 모델을 적용하여 리모델링 건축물의 에너지 절감효과를 평가하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) IMT를 적용한 분석 방법에서 리모델링 전후의 실제 에너지 사용량과 추정 사용량의 상관계수는 0.92 이상으로 높은 상관관계를 나타내었다.
(2) 분석대상건물의 리모 델링 후 에너지원별 절감량은 가스는 43.4%, 전기는 13.8%로 나타났다.
(3) 용도별 분석 결과에서는 냉방에너지 7.4% 증가, 난방에너지 42.3% 감소, 급탕과 취사에너지 3.4% 증가, 조명과 일반전기 19.3% 감소되어 전체 18.9%의 에너지가 절감되었으며, 전체 에너지 사용량 중 냉난방에너지 부분의 에너지 절감량을 별도로 산정하면 20.1% 절감된 것으로 확인되었다.

IMT는 상세 에너지 모니터링 데이터가 없는 건물의 전기, 가스 고지서 등 월별 에너지 사용량 데이터를 기반으로 손쉽게 리모델링 건축물의 에너지 성능개선 효과를 추정할 수 있는 방법이다. 통계적 처리에 따른 오차 발생의 문제, 추정 방법의 타당성 검증이 추가적으로 필요하지만 에너지 모니터링 시스템이나 BEMS가 보급되지 않은 대부분의 건축물에 적용될 수 있는 효과적인 평가방법으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부 첨단도시개발사업의 연구비지원(13CHUD-C060590-03-000000)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Statistics Korea, Korean statistical information service, 2013, Statistics of building.
2. Statistics Korea, Korean statistical information service, 2013, Statistics of building permission commencement works.
3. Christensen, C., Roberts, D., Polly, B., Bianchi, M., Kruis, N., and Anderson, R., 2010, Building energy simulation accuracy, National Renewable Energy Laboratory.
4. ASHRAE, 2002, Guideline 14-2002-Measurement of energy and demand savings, American Society of Refrigerating and Air-Conditioning Engineers.
5. Haberl, J. S. and Cho, S., 2004, Literature review of uncertainty of analysis methods(Inverse Model Toolkit), Report to the Texas Commission on Environmental Quality.
6. Goldberg, M. L., 1982, A geometrical approach to nondifferentiable regression models as related to methods for assessing residential energy conservation, Ph.D. thesis, Princeton University, NJ.
7. Fels, M. F., 1986, PRISM : An introduction, Energy and Buildings, Vol. 9, No. 1-2, pp. 5-18.
8. Fels, M. F., Kissock, J. K., Marean, M. A., and Reynolds, C., 1995, PRISM (Advanced Version 1.0) Users Guide, Center for Energy and Environmental Studies, Princeton University.
9. Schrock, D. W. and Claridge, D. E., 1989, Predicting energy usage in a supermarket, Proceedings, Sixth Symposium on Improving Building Systems in Hot and Humid Climates, Texas A&M University, Dallas, pp. 44-54.
10. Ruch, D. and Claridge, D. E., 1992, A four-parameter change-point model for predicting energy consumption in commercial buildings, Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The ASME, Vol. 114, No. 2, pp. 77-83.
11. Kissock, J. K., 1993, A methodology to measure energy savings in commercial buildings, Ph.D. theis, Texas A&M University, College Station, TX.
12. Kissock, J. K., 1994, Modeling commercial building energy use with artificial neural networks, Proceedings, 29th Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, Vol. 3, pp. 1290-1295, Monterey, CA.
13. Kissock, J. K., Xun, W., Sparks, R., Claridge, D., Mahoney, J., and Haberl, J., 1994, EModel Version 1.4de, Texas A&M University, College Station, TX.
14. Ruch, D., Chen, L., Haberl, J., and Claridge, D. E.,

1993, A change-point principal component analysis (CP/PCA) method for predicting energy usage in commercial buildings : The PCA Model, Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The ASME, Vol. 115, No. 2, pp. 77-84.
15. Ruch, D. and Claridge, D. E., 1993, A development and comparison of NAC estimates for linear and change-point energy models for commercial buildings, Energy and Buildings, Vol. 20, No. 1, pp. 87-95.
16. Rabl, A. and Rialhe, A., 1992, Energy signature models for commercial buildings : test with measured data and interpretation, Energy and Buildings, Vol. 19, No. 2, pp. 143-154.
17. Rabl, A., Norford, L., and Spadaro, J., 1992, Steady state models for analysis of commercial building energy data, Proceedings, ACEEE Summer Study on Energy Efficiency in Buildings, Pacific Grove, CA, pp. 9.239-9.261.
18. Ruch, D. and Claridge, D. E., 1992, A four-parameter change-point model for predicting energy consumption in commercial buildings, Journal of Solar Energy Engineering-transactions of The ASME, Vol. 114, No. 2, pp. 77-83.
19. Kissock, J. K., Haberl, J. S., and Claridge, D. E., 2002, Inverse Modeling Toolkit : Numerical Algorithms, ASHRAE KC-03-2-1(RP-1050).

ⓒ SAREK