

GCAM-EML을 이용한 대형상업용 건물에너지 효율변화의 장기영향 분석*

백민호** · Zulfikar Yurnaidi*** · 오재익**** · 김수덕*****

요 약

건물에너지소비절약을 위한 정책들이 구체적인 소비자감목표를 제시하지만 저감목표달성이 어떻게 가능할 것인가에 대한 정량분석 결과를 제시하지 못하고 있다. 본 연구는 GCAM-EML모형을 이용하여, 대형상업용건물에 적용될 수 있는 건물외피 효율강화 및 조명기기의 효율개선 등 두 개의 요인에 대해 각각 세부 시나리오 분석을 통해 이들 두 개 요인이 대형 상업용건물에너지 효율개선에 미치는 효과를 살펴 봄으로써 건물에너지의 효율개선 잠재력을 평가해 본다.

두 개의 에너지효율개선 관련 요인을 근거로, 시나리오 분석을 진행한 결과 기준안 대비 효율개선은 2030년에 최대 4.1%, 2055년에 8.5%로 나타났다. 이를 누적 에너지저감량으로 환산하면, 2030년 최대 2.36MTOE에 달하여 이는 2010년 대형건물의 총 에너지소비량의 1.16배에 해당한다

여러 에너지효율개선 정책 중 대형상업용 건물에너지 소비의 극히 일부

* 이 논문은 2015년 자원경제학회 정책토론회 및 학술대회에서 발표한 논문을 수정 보완한 논문입니다. 본 논문의 개선을 위해서 많은 조언을 하여 주신 에너지경제연구원 오경수 박사님, 그리고 익명의 심사자들에게 감사드립니다.

** 아주대학교 에너지시스템학과 박사과정(주저자). minhobaek83@gmail.com

*** 아주대학교 에너지시스템학과 석박사통합과정 . viczhoel@yahoo.com

**** 아주대학교 에너지시스템학과 연구교수 . jaickoh@gmail.com

***** 아주대학교 에너지시스템학과 교수(교신저자). suduk@ajou.ac.kr

분을 차지하는 두 개의 요인만의 효과가 이러하다면, 다양한 에너지효율개선 정책이 향후 건축물의 에너지효율등급 개선에 줄 수 있는 잠재적 영향력을 짐작할 수 있게 한다. 한편, 본 연구에서 사용한 방법론은 개별정책의 효과를 통합평가 함으로써, 정책목표를 종합적으로 점검하는데 활용할 수 있을 것으로 기대한다.

주요 단어 : 건물에너지인증제도, 대형상업용건물, 에너지총조사, 에너지효율, GCAM-EML

경제학문헌목록 주제분류 : O32, O38, Q48

I. 서 론

건물부문은 전 세계 에너지의 40%, 물의 25%, 자원의 40%를 소비하며, 온실가스의 33%를 배출 (UNEP-SBCI)하고 있는 반면 비용효과적으로 온실가스를 저감할 수 있는 잠재력이 있는 부문으로 평가받고 있다(IPCC, 2007). 건물부문 에너지 절약을 위해 International Energy Agency(IEA, 2011)에서는 신축 건물에너지절약설계기준 수립, 패시브 하우스·제로 에너지빌딩 보급, 기존 건물 효율향상, 건물 인증제도 운영, 기기·설비(Appliances)의 에너지 효율향상을 위한 에너지소비효율등급표시제도, 고효율에너지기자재인증제도, 대기 전력저감 프로그램 등의 운영을 권고하였다. 미국의 Energy Star 제도, 영국, 프랑스, 독일의 EPC(Energy Performance Certification) 등 유럽에서도 비슷한 사례가 제시되고 있다.

2014년 발간된 에너지통계연보에 따르면, 우리나라에서 건물부문은 최종에너지 기준으로 국가 에너지 소비량의 20.0%를 사용하고 있는 것으로 나타난다. 국내에서도 2004년부터 2010년간의 실제 에너지총조사 결과 건물부문 특히 상업공공부문의 에너지소비증가율이 동기간 연평균 4.65%로 여타부문 전체평균인 2.48%보다 훨씬 높은 증가율을 보이고 있다.¹⁾

정부는 건물부문 에너지 소비 절약을 유도하기 위한 IEA 권고를 다양한 정책으로 개발하여 시행하고 있다. 국토교통부는 에너지이용효율 및 신재생에너지의 사용비율이 높고 온실가스 배출을 최소화하는 건축물의 보급을 위해 녹색건축인증제를 시행하고 있다.²⁾ 산업통상자원부를 중심으로 한 에너지이용합리화계획(관계부처합동, 2014)에서는 에너지원단위개선, 전환손실 개선, 최종에너지소비억제 관련 목표를 제시하고 있다. 또 건축물 에너지효율등급 인증제 단계적 의무화를 정책목표로 제시하고 있다.

건축물 에너지효율등급 인증제도에 대한 상세한 내용은 국토교통부(2014.3)에서 확인할 수 있다. 이에 따르면, 관련제도는 2001년 산업부의 시작 이후 2010년부터 국토교통부·산업통상자원부부 공동으로 운영되고 있으며, 건축물의 에너지성능을 정량적이고 객관적인 정보로 제공하기 위한 등급제도이다. 건축법³⁾에 시행근거를 두고, 인증대상은 2001년 신축 공동주택, 2010년 신축 업무용건물에서 2013년 9월부터 건축주의 자발적 신청에 의거, 신축·기존 건물로 확대되었다. 기존의 공공건축물 의무 인증대상을 업무용에서 2014년 9월부터는 모든 용도(연면적 3천㎡ 이상)로 확대하고, 2016년부터는 민간 건축물은 500세대 이상, 연면적 3천㎡ 이상 업무시설부터 단계적으로 의무화되고, 에너지효율등급 인증기준 강화 및 등급 세분화와 함께 민간, 공공 분야의 참여가 증가하고 있다.

국토교통부(2015)에 의하면, 2013년 3월까지 에너지효율등급 인증제도에 참여하여 공동주택과 업무용 건물은 각각 약 23만여 가구, 117개 단지가 본인증을 얻어 공동주택은 58,858 TOE의 에너지를 절약하고, 온실가스 137,595 TCO₂ 감축하였으며, 업무용 건물은 15,621 TOE의 에너지를 절약하고, 39,590 TCO₂

1) <부표 1> 참조

2) 인증대상건물은 공동주택, 복합건축물(주거), 업무용건축물, 학교시설, 판매시설, 숙박시설, 소형주택, 기존공동주택, 기존 업무용 건축물, 그 밖의 건축물이 대상이 된다. 인증대상 건축물에 대해 인증등급산정표상 '에너지 및 환경오염'부문의 분야별 최종점수 부여하고, 녹색건축물로 인증함으로써 녹색건축물 조성 지원법 제 7조에 의거한 녹색건축 인증의 취득 의무를 다 하도록 규정하고 있다.

3) 건축법 제66조의2에서 「녹색건축물 조성지원법」 시행('13.2.23)으로 근거변경(제17조)

를 감축한 것으로 평가된다. 2015년 1분기까지 주거용 건물은 약 50만호, 주거용 이외 건축물 303건이 본인증을 받은 것으로 보고하고 있다.⁴⁾ 이러한 에너지절감효과는 녹색건축물 인증제도를 통해 부여된 인증등급이 일정기준 이상인 경우, 녹색건축물 인증관련 인센티브가 부여되고 있다는 점을 들 수 있는데, 구체적으로 지방세특례제한법 제47호에 의거한 지방세 감면혜택(5%~15%까지), 건축물의 에너지절약설계기준 제15조, 제16조:용적률, 조경면적, 건축물 높이제한 규정에 의거한 건축물 기준 완화(4%~12%까지), 그리고 환경개선부담금 경감(20%~50%까지) 등의 혜택이 주어지고 있다.⁵⁾

건축물 에너지 효율인증제도와 관련하여 국내에서는 공학적 기준에 의한 건물에너지효율등급 개선효과의 실증분석이 진행되고 있다. 방영현 외(2012)는 건물에너지 효율등급의 인증사례를 바탕으로 에너지 및 온실가스 저감량에 대한 시나리오 분석을 하였다. 기타 대부분의 국내 연구에서는 건물의 외피 열성능과 건축물 에너지 효율등급의 영향을 공학적 기준에 의해 비교적 단기의 최종에너지 사용량 기준으로 실증평가하고 있다. 에너지경제연구원(2014)는 에너지의 이용형태가 상당히 복잡하고 다양한 건물부문의 효율문제의 발생원인을 계량모형으로 정량적 분석을 시도하고 있다. 에너지관리공단(건물에너지절약사업 홈페이지)에는 정량화하여 제시하는 대신, 건축물 에너지효율등급 인증제도 도입효과를 소비자, 주택사업체, 국가의 편익을 정성적으로 설명하고 있다. 건물의 에너지소비와 관련하여 건물의 에너지사용 기술 전반에 대한 정보를 바탕으로 통합평가 구조에서 분석한 연구(Yu et al., 2014; Zhou et al., 2014; Eom et al., 2012; Chaturvedi et al., 2014)는 건물부문을 주

4) 건축물 에너지효율등급 인증제도에서 효율등급의 예비인증을 위해서 건축물의 설계도서를 바탕으로 에너지 저감량을 계산하는 에너지성능평가프로그램을 사용하고 있다. “예비인증”이란 건축물의 완공 전에 설계도서 등을 통하여 평가된 결과를 토대로 에너지효율등급을 인증하는 것을 말한다. “본인증”이란 건축물의 준공 승인 전에 최종설계도서 및 현장확인을 거쳐 최종적으로 평가된 결과를 토대로 에너지효율등급을 인증하는 것을 말한다.

5) 출처: 녹색건축인증제도 소개, 한국환경산업기술원, <https://www.gbc.re.kr/app/info/outline.do>

거용, 상업용으로 구분하고, 에너지서비스는 난방, 냉방, 기타로 구분하였다. 이러한 단순분류는 국내 데이터를 바탕으로 세분화할 수 있는 여지가 있으며, 일부 데이터의 보완이 필요하다.

또한 기존 연구들은 건물부문의 특정요인이 갖는 에너지환경 측면의 효과를 평가함에 있어 정성적인 평가에 그치거나, 정량적 평가라 하더라도, 공학적 기준만으로, 단기적으로 평가하는데 그치고 있다. 건물 에너지효율 증가는, 우선, 적정한 냉난방, 취사, 조명 및 기타 가전기기의 사용으로부터 발생하는 에너지서비스 수요의 수준을 감소시킨다. 감소된 에너지서비스 수요⁶⁾는 외기 기온, 건물외피의 열손실률과 관련한 공학적 변수 뿐 아니라, 에너지서비스의 가격, 소득, 인구, 건축물 면적 수요 등의 사회경제적 요인에 의해 영향을 받는다. 또한 에너지서비스 수요 감소는 최종부문, 전환부문의 에너지 소비 감소와 1차 에너지 수입 감소, 온실가스 배출량 감소에 영향을 미친다. 따라서, 건물부문 내 세부 조건 변화가 갖는 효과를 평가하기 위해서는 이들 조건이 최종적으로 영향을 주게 되는 경제전반에 대한 평가가 가능한 통합평가구조에서 분석할 필요가 있다. 이는 에너지이용합리화계획 등에서 제시하는 에너지절약정책 등이 대부분의 경우, 다양한 정책의 목표가 갖는 에너지저감 잠재량을 제시하고 있지만 실제 어떤 경로를 통해 이러한 목표가 달성될 수 있는지를 정량적으로 보여주고 있지 않다는 점에서 이에 대한 한 가지 대안으로 제시할 수도 있다는 장점이 있다.

따라서, 본 연구는 전수조사를 진행하고 있는 특수용도의 건물⁷⁾을 제외한 2000TOE 이상의 에너지를 사용하는 대형상업용 건물부문을 대상으로, 건물부문 효율향상을 위한 정책효과를 통합평가모형의 틀 내에서 정량적으로 분석해 보고자 한다. 특히 지적하여야 할 사항은, 건물에너지의 효율에 영향을

6) 에너지서비스 수요는 최종에너지 사용량과 에너지효율의 곱으로 정의되고, 일정수준으로 점근적으로 수렴하는 포화함수(Saturation function)의 형태이다. 따라서 특정한 에너지서비스 수요로의 점근적 변화 과정에서 최종에너지 사용량은 감소하면서 에너지효율은 증가하는 형태를 띤다.

7) 제외된 특수용도의 건물관련 내용은 부록 참조

미치는 요인들은 매우 광범위하여 모든 세부정부를 update한 모형을 구현하는 것은 불가능하며, 다양한 분야의 관련 전문가들의 지속적인 협력연구를 통해서 확인되지 않았던 부분의 효과를 추가로 확인해 가는 과정을 거치게 될 것이라는 사실이다. 본 연구에서는 어느 정도 관련 분야의 실적 데이터를 확인할 수 있는 건물의 물리적인 열효율특성, 조명에너지 등 두 가지 요인만을 대상으로 한정하여 건물에너지 효율개선의 효과를 평가하고자 한다.

제2장에서는 분석모형, 연구에 동원된 데이터 및 평가를 위한 시나리오 구성에 대해 설명한다. 에너지총조사 자료를 바탕으로 우리나라의 건물유형에 따라 주거용 5개 건물(단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 상가주택), 상업대형, 상업중소형 등으로 분류하여 GCAM-EML 모형의 기준에너지시스템을 어떻게 구성하였는지를 설명한다.⁸⁾ 그리고, 정책목표를 달성하기 위해 제시된 에너지효율개선 프로그램들이 건물부문 에너지사용량에 미치는 효과를 분석하기 위해 해당 요인들에 대한 시나리오를 작성한다. 제 3장에서는 시나리오 분석 결과를 바탕으로 이들 요인이 갖는 개별효과와 누적효과를 제시한다. 특히 정량적인 결과가 대형상업용건물의 에너지효율등급에 어떤 영향을 미칠 것인지 살피고, 제 4장에서 분석결과가 갖는 건물부문의 효과와 의미를 평가하고자 한다.

8) GCAM은 JGCRI (Joint Global Change Research Institute, Pacific Northwest National Lab.)에서 개발, 운용하고 있는 통합평가모형으로 IPCC 5차보고서 작성시 RCP (Representative Concentration Pathway) 4.5 시나리오 분석에 사용된 통합평가모형이다. 미국 Climate Change's Science Program 시나리오 분석과 Climate Change Technology Program, Energy Modeling Forum, 기업의 기후변화 전략과 관련한 연구, EIA's Climate Economic Model (Integrated Assessment), 그리고 EPA (Environmental Protection Agency)에서 사용되고 있다. EML(Energy Modeling Lab.)은 아주대 에너지학과의 모형연구실을 의미하며, GCAM-EML은 GCAM모형을 소스코드레벨에서 확인하고, 새로운 데이터 구조를 정의하여 반영할 수 있는 유연한 구조의 UI를 추가한 프로그램으로 국내 에너지시스템 모형을 건물부문, 산업, 수송부문으로 세분화한 모형이다(참조: http://eml.ajou.ac.kr/eml/?page_id=692).

II. 분석모형, 데이터 및 시나리오

1. GCAM-EML

본 연구는 GCAM-EML의 국내 건물부문을 세분화하여 분석모형으로 사용하였으며, 주요 특징은 GCAM과 같다. GCAM은 거시경제와 에너지시스템-토지사용-기후시스템⁹⁾을 모듈화하여 연결한 프로그램으로 정책변화가 각 시스템에 미치는 영향을 연결하여 통합평가한다. 에너지시스템은 지역별 에너지 자원의 생산특성을 고려한 공급과 수요가 균형을 이루는 각 단계별 가격체계의 해를 구함으로써 각 시장의 균형수요를 찾아내는 형태로 구성되어 있다. 에너지 전환부문은 천연가스와 정유 및 가공, 바이오에너지 정제, 전력생산, 수소생산 등을 반영하고 있다. 기술변화는 외생적으로 결정되고, 최종 에너지 사용부문은 건물, 수송, 산업 등으로 구분된다.¹⁰⁾ 모형에 구현된 각 부문과 에너지서비스 유형의 세분화 내용, 그리고 소비자단계의 기술유형 구분에 관한 내용은 <부표 2>에 정리되어 있다.

최종소비단계의 개별 기술선택과정은 조건부 로짓형태의 확률적 선택과정으로 모사(Clarke and Edmonds, 1993) 되어, 소위 ‘winner-takes all’ 등의 문제가 나타나는 linear programming 모형의 단점¹¹⁾을 개선하고 있다. 또 각 부문별 최종에너지수요를 산정하기에 앞서 최종단계에서 필요로 하는 에너지

9) GCAM의 기후시스템 MAGICC(Model for the Assessment of Greenhouse-Gas Induced Climate Change) 은 Mini-Climate Assessment Model을 개선한 프로그램으로 각 모형에 대한 자세한 정보는 각각 https://wiki.umd.edu/gcam/index.php/Main_Page 와 Brenkert et al., 2003에서 참고할 수 있다.

10) 세부 내용은 <https://wiki.umd.edu/gcam/> 참조

11) Keepin 외(Nature, 1984) 참조

서비스 수요를 명시적으로 산정함으로써, 각 기기별 에너지효율을 명시적으로 고려하고 있다는 특징이 있다.

GCAM의 건물 에너지시스템 모형은 우리나라 에너지시스템을 가정용, 상업용 건물로 구분하고 최종에너지 사용현황을 포괄적인 수준에 제시하고 있는데 반해, 본 연구에서는 에너지총조사 보고서 및 관련 raw data, 그리고 건물부문 관련 선행연구 및 여타 DB¹²⁾를 이용하여 우리나라 건물부문을 5개 유형의 가정용건물, 2000TOE 이상 에너지를 소비하는 대형상업용건물과 그 외 중소상업용건물로 나누어 2010년 기준으로 모형을 구성하였다.¹³⁾

2. 건물부문 모델

GCAM에서 건물부문의 총 에너지서비스 수요($Q_{s,t}$)는 단위면적당 에너지서비스수요($q_{s,t}$)에 총 건물면적(F_t)의 곱으로 표시된다(JGCRI/PNNL, 2014). 우선, 단위면적당 에너지서비스 수요($q_{s,t}$)는 다음과 같이 열부하 수요($L_{s,t}^D$)와 에너지서비스 밀도($D_{s,t}$)의 곱으로 구성된다.

$$q_{s,t} = k_{s,t} \times L_{s,t}^D \times D_{s,t} \quad (1)$$

$q_{s,t}$: 단위면적당 에너지서비스 수요 [GJ/m^2]

$k_{s,t}$: 기준년도 data로부터 calibration되어 얻어지는 상수

$L_{s,t}$: 열부하 수요 (난방 또는 난방) [GJ/m^2]

$D_{s,t}$: 에너지서비스 밀도 [GJ/m^2]

12) 관련 내용은 본문에서 해당부문 모형 설명시 추가설명을 확인할 수 있다.

13) 대형건물 데이터는 전수조사자료이며, 건물부문 이외에도 최종에너지시스템 중 산업은 산업부문은 Yurnaidi et al. (2014)에 상세화 작업 내용이 제시되어 있으며, 수송부문은 국내 자료와 Mishra et al. (2013)의 연구를 참고하여 상세화하였다.

s : 에너지서비스의 용도(냉방, 난방)

t : 연도

열부하 수요($L_{s,t}^D$)와 에너지서비스 밀도($D_{s,t}$)를 차례로 설명하면 다음과 같다. 열부하 수요($L_{s,t}^D$)는 외기조건과 건물의 단열기술을 반영할 수 있도록 아래와 같이 구성되어 있다.

$$L_{s,t}^D = D_{s,t}^D \times C_t \times R_t + \lambda_{s,t} \times g_t \quad (2)$$

$D_{s,t}^D$: 난방도일($D_{s,t}^H$) 또는 냉방도일($D_{s,t}^C$) [$day^\circ C$]

C_t : 건물외피 효율강화율 (열관류율, U-value) [$GJ/m^2 day^\circ C$]¹⁴⁾

R_t : 건물바닥 대비 외피비율

$\lambda_{s,t}$: 실내발열 상수

g_t : 단위면적당 실내발열량 [GJ/m^2]

단, 실내발열 상수($\lambda_{s,t}$)값에 대한 정보가 별도로 주어지지 않아, 현재로는 0으로 처리하였음을 밝힌다. 위의 식에서 건물외피 강화비율(C_t)은 외부기온과 실내온도의 차이에 의해 건물외벽에서 발생하는 열전달을 나타내는 상수이다. 특정지역의 난방도일을 HDD_r 이라고 표시하는 경우, GCAM의 기본모형은 해당지역의 열류관율(C_t)을 다음과 같은 방법으로 제시하고 있다.

$$C_t = C_{US,0} * \left(\frac{HDD_r}{HDD_{US}} \right)^{\epsilon_{HDD}} * \left(\frac{GDP_{r,t}}{GDP_{US,t}} \right)^{\epsilon_{GDP}} / (1 + eff)^t \quad (3)$$

14) “열관류율”이란 표면적이 1제곱미터인 물체를 사이에 두고 온도차가 섭씨 1도일 때 물체를 통한 열류량을 와트(W)로 측정한 값을 말한다.

ϵ_{HDD} : 건물외피 효율강화율의 HDD탄력성 (default 값은 -2.0%)

ϵ_{GDP} : 건물외피 효율강화율의 GDP탄력성 default 값은 -10.0%)

eff : 효율개선효과 (default 값은 0.45%)¹⁵⁾

건물바닥-외피 비율(R_t)는 외부온도에 노출된 건물 외벽의 규모를 나타내는 건물외피/건물바닥의 비율이며 GCAM ver.4.0은 해당값을 전세계적으로 5.5라는 default값으로 적용하고 있다.¹⁶⁾ 단위면적당 실내발열량(g_t)¹⁷⁾은 냉난방의 에너지서비스의 수요량에 비례한다. 따라서 열부하 수요($L_{s,t}^D$)는 안락한 실내온도와 외부기온의 차이에 의해 발생하는 연간 냉난방요구수준, 건물외벽

15) 우리나라는 1970년대 말부터 건물단열기준을 법제화하여, 3개 지역(중부, 남부, 제주) 및 건축물 부위별(거실외벽, 최상층 거실의 반자 또는 지붕, 최하층 거실바닥, 공동주택 측벽, 공동주택 층간바닥, 창 및 문) 단열기준을 제시하고 있다. 중부지역을 기준으로 2002년~2013년 사이 건축물 부위별로 총 23~60%까지 효율 개선이 이루어졌으며 부위별로 평균 4%의 효율이 개선되었다(국가법령정보센터). Scott et al. (2014)에서는 에너지사용과 관련한 건물외피효율에 대하여 노후도, 회전율, 건물유형에 따른 건물 stock의 분포 등과 같은 다양한 변수를 포함하는 함수와 같다고 설명하고 있다. 예를 들어 주거용 건물은 가족형태, 노후도, 크기에 따라 구분할 수 있으며, 그에 따라 벽체, 지붕, 창문, 문과 바닥 등의 열저항 차이, 신규건물과 기존 건물에 적용되는 신규 code와 도입률 등의 차이로 불확실성이 있다. 이 불확실성은 신규건물의 외피개선 기준율을 설정하여 해소할 수 있고, 평균 건물외피 효율향상률은 당해기에 존재하는 건물의 vintage-weighted 효율 변화로 계산할 수 있다고 밝히고 있다. Scott et al. (2014)의 연구 중 Building technology scenarios의 Slowest case에서는 2021~2050년 사이 매 10년 동안 4%의 효율향상, 2051~2095년 사이 2.5%의 효율 향상을 가정하였으며, Fastest case에서는 동기간 5%와 2.5%를 가정하였다. 본 연구의 효율개선효과는 기본모형을 자료를 바탕으로 하되, 우리나라의 건물외피효율 개선률은 우리나라의 건물외피 효율 강화율 기준에 의한 개선비율과 Scott et al. (2014)의 연구를 고려하여 설정하였음을 밝힌다.

16) 관련 정보는 국내 조사된 값을 찾지 못하였으나, 최종 calibration 단계에서 식 (1)의 $k_{s,t}$ 값을 통해 기준년도 값이 보정됨을 알 수 있다.

17) 실내발열량은 internal heat gain으로 지칭되며, 건물에서 사용하는 냉난방 목적 외의 기기가 발생시키는 열을 의미한다. 난방기기 외 기타 기기가 발생시키는 열은 난방수요를 줄이는 반면, 냉방수요는 증가시키는 효과가 있다.

의 면적, 건물외벽에 의한 열손실, 실내발열 등을 반영한 포화수요이다.

에너지서비스 밀도($D_{s,t}$)는 단위면적당 에너지서비스 수요를 나타내는 식으로 아래와 같다. 기본적으로 에너지서비스에 대한 포화수요가 주어지는 경우, 소득이 증가하면, 또 가격이 하락하면 에너지서비스 밀도가 증가하도록 구성되었다.

$$D_{s,t} = (S_s^L - S_s^A) \times \left(1 - e^{-\frac{\ln 2}{\mu_s} \times \frac{i_t}{P_{s,t}}} \right) + S_s^A \quad (4)$$

S_s^L : 에너지서비스의 포화수요 [GJ/m^2]

S_s^A : 에너지서비스의 최소수요 [GJ/m^2]

μ_s : 에너지서비스의 포화 임피던스(Saturation Impedance)¹⁸⁾

$P_{s,t}$: 에너지서비스가격(기준년도대비 비교년도 상대가격으로 표시)

i_t : 1인당 소득¹⁹⁾

최종적으로, 총 건물면적(F_t)은 다음과 같이 구성된다.

$$F_t = f_t \times Pop_t \quad (5)$$

f_t : t 시점의 1인당 건물면적수요

Pop_t : t 시점의 인구

18) 에너지서비스 수요의 포만 임피던스 (μ_s)는 에너지서비스에 대한 포화수요와 기준년도 자료가 주어지면, 주어진 소득수준 및 균형값을 맞추는 각 시장의 가격이 결정되면 내부적으로 calibration되어 계산된다.

19) 1인당 소득은 외생적으로 결정되는 인구(Pop), 노동참여율(LF), 노동생산성 증가율(lp)이다. $Y_{t1} = Y_{t0} \cdot ((Pop_{t1} \cdot LF_{t1}) / (Pop_{t0} \cdot LF_{t0})) \cdot (1 + lp_{t1})^{(t1-t0)}$ 을 인구로 나눈 값이다.

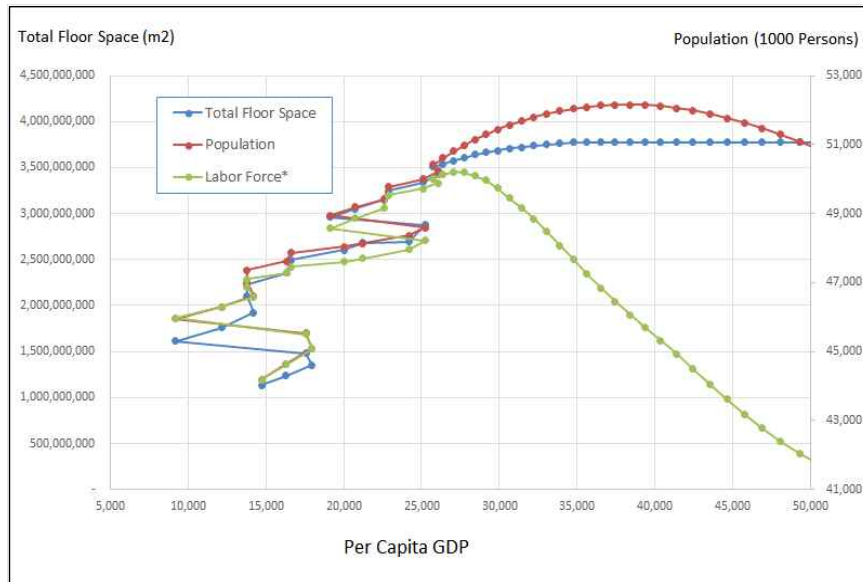
특히 여기에서, t 시점의 1인당 건물면적수요(f_t)는 상기 식 (3)의 형태로 구성되어 있다. 식 (4)로부터, μ_s 값은 포화수요 S_s^L 이 어떻게 주어지느냐에 따라 기준년도 값을 calibration하게 된다. 결국, 건물부문 에너지서비스 수요를 결정함에 있어, 포화수요를 어떻게 결정하는가는 매우 어려운 문제 중 하나이다. Eom 외 (2012)에서는 각국의 1인당 건물면적의 추이를 1인당 GDP 단위로 제시하고 있지만, 중국의 1인당 건물면적에 대한 포화수요는 해외 사례와 견주어 주관적으로 범위를 정해 제시하고 있음을 확인할 수 있다.²⁰⁾ 아래는 e-나라지표의 건축물현황 중 ‘지역별/면적별 건축물 현황’의 시계열자료²¹⁾와 통계청의 총인구 및 노동참여인구 추계를 사용하여 그 추이를 US 달러로 표시한 1인당 실질 GDP에 대비시켜 살펴본 그림이다. 인구의 최댓값이 2030년으로 추계된 반면, 노동참여인구는 2016년 최대가 되고 이후 점차 감소하는 것으로 통계청은 전망하고 있다. 총 건물면적의 수요는 총 인구에 직접적으로 영향을 받겠지만, 소득을 창출하는 노동참여인구에 의한 수요에도 영향을 받을 것임을 감안하여 최대가 되는 시점을 대략 2026년 정도로 하고, 포화면적을 기준년도인 2010년 대비 1.2배가 되도록 전제하였음을 밝힌다.²²⁾

20) Eom 외(2012)의 Figure 7, 8 (pp.14, 15)참조

21) http://www.index.go.kr/potal/main/EachDtlPageDetail.do?idx_cd=1226, 그림에서 Labor force* 는 편의상 기준년도의 총인구와 비교가능하도록 그 차이를 더해 주어 제시한 그림이다.

22) 국내 건축물 유형별 총면적 전수의 추이에 관한 자료는 국토부 건축물대장으로부터 확인할 수 있을 것으로 보이지만, 현재 raw data나 정리된 관련자료가 없어 확인이 불가능하다.

[그림 1] 포화수요를 계산하기 위한 총 건물면적, 인구, 노동참여인구의 추이



3. 데이터 및 시나리오

1) 기준년도 최종에너지 데이터

본 연구에서 기준년도의 최종에너지 데이터 입력값 구축을 위해서 2011년 보고된 에너지총조사의 건물부문 데이터 및 에너지 용도별 에너지사용량 구분에 대한 선행연구, GCAM의 최종에너지원별 데이터를 이용하였다.

에너지총조사(에너지경제연구원, 2011, 2008, 2005)의 건물부문 데이터²³⁾는 건물부문을 주거용(단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택, 상가주택), 상업

23) 각 년도별 총조사보고서는 전년도의 실적에 대한 조사결과이므로, 이하 본 연구에서 표기할 때는 각각 2010, 2007, 2004년도로 실적년도 기준으로 표기함을 밝힌다.

공공, 대형으로 구분하고 있다. 주거용 건물의 에너지 소비량 데이터는 주택 형태-에너지원별로 구분되어 있는 반면 상업공공, 대형건물은 건물유형-에너지원-에너지서비스별²⁴⁾로 최종에너지 소비량 데이터를 제공하고 있다. 주거용 건물의 에너지서비스별 데이터 구분을 위해 관련 연구 (이성근 2010; 최문선, 2012)를 참고하였다.²⁵⁾ 또 기준년도 건물면적에 대한 정보는 단위면적당 에너지사용량을 산정하는 기준이 되는 것으로 본 연구에서는 <표 1>에 제시된 국토교통부의 자료를 이용하였다.²⁶⁾

〈표 1〉 기준년도 건물면적(2010년)

건물유형		기준년도 건물면적 [billion m ²]
주거용	단독주택	0.425
	아파트	0.952
	연립주택	0.036
	다가구주택	0.092
	비주거용	0.336
대형상업용		0.111
중소형상업용		1.342

주: 국토교통부 (2013)

가정부문의 주택형태-에너지원-에너지서비스별 데이터는 에너지원-에너지서비스별 소비비율과 에너지총조사 가정부문의 주거형태-에너지원별 소비량을 곱하여 구한다.²⁷⁾ 이 분류에 따라 건물부문의 에너지원별 최종에너지 사용

24) 상업공공 건물은 난방·온수, 냉방, 동력, 조명, 취사·기타, 대형건물은 냉방, 난방, 급탕, 일반동력, 조명, 사무기기 및 기타 등으로 에너지서비스를 구분하고 있다.

25) 이성근(2010)의 연구는 2008년까지의 에너지원-에너지서비스별 결과만을 제시하고 있어 기준년도인 2010년과 시점상 차이가 있으나, 에너지서비스별 최종에너지 사용량에 대해 상세정보를 제공하고 있어, 2008년의 비율을 적용하였다.

26) 에너지총조사의 건물유형별 면적자료는 표본조사의 결과이므로 총량에 관한 정보로는 부적합하다.

27) 2011년 에너지총조사 보고서는 주택형태별로 에너지원-에너지서비스별 소비비율에 대해 보고하고 있지 않아 관련 정보가 확인되지 않는다는 문제점이 있다 (해당 보고서

량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\sum_j \sum_i E_{i,j,k} = E_k \quad (6)$$

i : 건물유형 (주거용, 상업공공, 대형)

j : 에너지서비스 유형 (난방, 온수, 냉방, 취사, 조명, 가전 및 기타)

k : 최종에너지원별 유형 (연탄, 석유, 도시가스, 전력, 기타)

여기에서 각 건물유형별-에너지원-에너지서비스별 최종에너지 사용량의 가중치(w_k)를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$E_{i,j,k} / E_k = w_k \quad (7)$$

위의 가중치를 바탕으로 분석에 기준년도 건물유형-에너지원-에너지서비스별 최종에너지 사용량 ($\widehat{E_{i,j,k}}$)은 다음과 같다.

$$\widehat{E_{i,j,k}} = w_k \times E_k^G \quad (8)$$

단, 여기서 E_k^G 는 전 세계의 에너지밸런스표를 보고하고 있는 IEA의 자료를 기반으로 하는 GCAM 기준년도 건물부문²⁸⁾의 최종에너지 사용량이다.

P.589-591 참조).

28) GCAM의 기준년도 최종에너지 에너지사용량은 순발열량 기준으로 작성된 IEA 에너지밸런스표를 기준으로 작성되었다. 작성과정에서 64개 에너지상품(product)과 94개 흐름(flow)이 에너지상품별, 에너지흐름별로 합산되어 전환, 최종에너지 사용부문 등으로 Mapping된 값이다(Kyle, 2010).

2) 분석대상

분석대상은 아파트를 제외한 2,000 TOE 이상의 에너지를 소비하는 건물의 전수가 조사되어 있는 대형상업용건물이다. 대형건물은 최근 에너지원간 대체가 진행되어 2004년 이후 전력이 가장 높은 비중을 차지하고 있다(산업통상자원부, 2015). 2011년, 2008년, 2005년 에너지총조사 대형상업용건물 최종에너지 소비량의 원자료에 「에너지효율등급 인증기준」에서 제시하는 1차 에너지 전환계수²⁹⁾를 곱하여 대형건물의 1차 에너지 소비량의 분포를 <표 2>와 같이 산정하였다. 각 자료의 분포를 [그림 2]로 제시하고 그 변화의 추이의 살펴보았다.³⁰⁾

〈표 2〉 대형상업용건물의 단위면적당 연간 에너지사용량 분포추이

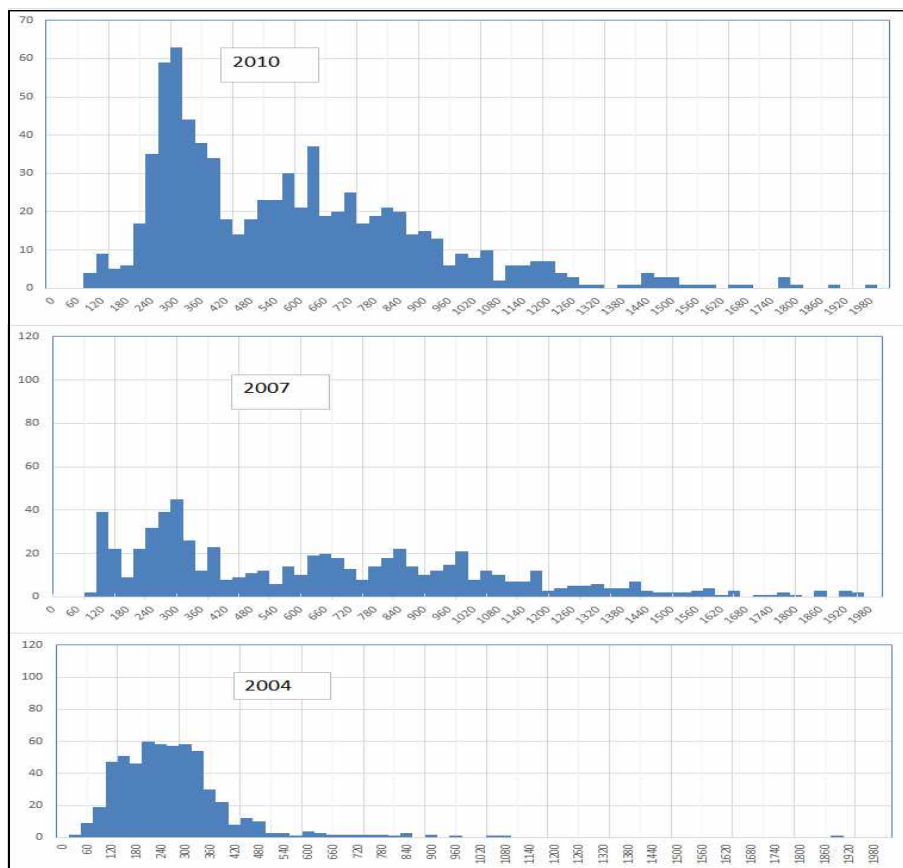
등급	연간단위면적당 1차에너지소요량	2011			2008			2005		
	(kWh/㎡·년)	구간빈 도	구간비 율	누적비 율	구간빈 도	구간비 율	누적비 율	구간빈 도	구간비 율	누적비 율
1+	80 미만	0	0.000	0.000	280	0.294	0.294	13	0.023	0.023
1	80 이상140미만	15	0.019	0.019	54	0.057	0.351	83	0.144	0.166
2	140 이상200미만	9	0.012	0.031	24	0.025	0.376	97	0.168	0.334
3	200 이상260미만	70	0.090	0.121	67	0.070	0.446	121	0.210	0.544
4	260 이상320미만	118	0.152	0.274	76	0.080	0.526	110	0.191	0.735
5	320 이상380미만	78	0.101	0.375	35	0.037	0.563	75	0.130	0.865
6	380 이상450미만	49	0.063	0.438	32	0.034	0.597	32	0.055	0.920
7	450 이상520미만	48	0.062	0.500	23	0.024	0.621	15	0.026	0.946
등급 외	520 이상610미만	74	0.096	0.596	30	0.032	0.652	8	0.014	0.960
합계	610 이상700미만	313	0.404	1.000	331	0.348	1.000	23	0.040	1.000
	전체표본	774			952			577		

29) 에너지효율등급 인증기준의 상세내용은 건축물에너지효율등급인증제도운영규정 [별표 3]을 참조 http://www.kemco.or.kr/building/v2/buil_cert/buil_cert_1_2.asp

30) 2008, 2005년 자료에서는 신재생에너지부문이 각 원별 용량과 단위만 표시되어 있어, 이를 감안하지 못하였음을 밝힌다. 다만 2011년의 자료에서 그 비중이 0.495%임을 감안한다면 결과에 큰 영향을 주지 않았을 것임을 쉽게 알 수 있다. 또 단위면적당 1차 에너지 소비량(PE)이 2,000 kWh 를 초과($PE/m^2 > 2000kWh$)하는 건물을 제외하였다. 부록에는 제외된 표본(2011년 기준, 33개)이 대부분 데이터센터나 냉동창고 등의 특수 용도 건물임을 확인할 수 있다.

시나리오 분석결과는 건축물 연면적과 에너지소비량 등의 정보가 주어지므로, 이를 바탕으로 연간 단위면적당 1차 에너지 소비량($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{년}$)의 평균을 계산할 수 있다. 상기의 분포정보를 활용하면, 두 개 요인에 대한 시나리오 분석의 결과에 따른 새로운 분포를 얻을 수 있으며, 이는 인센티브 구조가 반영된 건축물 에너지효율등급제 시행에 따른 대형상업용건물의 효율등급변화를 추정해 볼 수 있다.

[그림 2] 대형상업용건물 단위면적당 연간에너지사용량($\text{kWh}/\text{m}^2 \cdot \text{년}$) 분포



3) 시나리오와 전제

본 연구에서는 건물외피 효율 강화, 조명에너지 효율개선에 대해 다음과 같이 시나리오를 설정하였다. 본 연구에서는 외피비율(U; U-value)관련 시나리오 3개 (URef, UAdv, ULow)와 조명(L; lighting) 효율개선관련 3개(LAdv, LRef, LLow)의 조합으로 <표 3>과 같이 구성하였다.

〈표 3〉 대형상업용건물에 적용하는 9개 시나리오의 내용

	LAdv	LRef	LLow
URef	외피효율 0.5%, 조명효율개선 2% LED비용하락 3%	외피효율 0.5%, 조명효율개선 1% LED비용하락 2%	외피효율 0.5%, 조명효율개선 0.5% LED비용하락 1%
UAdv	외피효율 0.75%, 조명효율개선 2% LED비용하락 3%	외피효율 0.75%, 조명효율개선 1% LED비용하락 2%	외피효율 0.75%, 조명효율개선 0.5% LED비용하락 1%
ULow	외피효율 0.25%, 조명효율개선 2% LED비용하락 3%	외피효율 0.25%, 조명효율개선 1% LED비용하락 2%	외피효율 0.25%, 조명효율개선 0.5% LED비용하락 1%

건물외피 효율강화(열관류율) - 건물외피와 관련 내용은 앞서 건물모형에서 설명한 바와 같다. 건물외피 효율 개선 시나리오는 건물 외장재의 효율개선에 의해 건물외피 효율강화율에 대한 몇 가지 가정으로 구성하였다. 본 연구에서는 국내 건물외피 효율강화율 개선 목표와 관련 실증정보가 부족하여 가정용 건물, 상업용 건물의 연평균 0.5%의 건물외피 효율강화율 개선을 가정하여 기준(Ref) 시나리오로 삼고, Low(0.25% 효율개선), Adv(0.75% 효율개선)을 설정하였다.³¹⁾

31) 각주 15)의 내용을 감안하면 과도한 시나리오라고 보기 어렵다고 사료된다.

조명에너지 효율개선 - 에너지서비스 공급기술의 효율개선에 대한 시나리오오는 지식경제부·에너지관리공단(2010)을 참고하였다. 에너지소비효율 등급제도와 대기전력저감프로그램, 고효율전동기 생산·판매 의무화, 콘덴싱 가스보일러, 백열전구 퇴출 및 LED 보급, 가전기기 평균에너지효율 목표관리제(Top Runner) 등에 의한 기술향상 목표와 에너지소비 절감 사례에 대한 다양한 보고가 있다.³²⁾ 다양한 효율개선제도에 의한 기기별 에너지효율의 영향분석이 필요하지만, 너무 많은 시나리오의 구성은 통합평가의 결과를 복잡하게 하여 직관적이지 못한 결과를 가져다 줄 위험성이 있으므로, 여기서는 백열전구 퇴출과 LED 효율개선 및 비용하락에 대한 시나리오를 설정하였다.³³⁾ 2015년 효율을 기준으로 기준시나리오(LRef)는 1%효율개선, 2%의 LED비용하락, Low시나리오(LLef)는 0.5%효율개선, 1%의 LED비용하락, Adv시나리오(LAdv)는 2%효율개선, 3%의 LED비용하락을 가정하였다.³⁴⁾

32) 해당자료에 의하면, 1999년부터 2009년까지의 약 11년간의 백열구와 형광등의 추이에 백열구의 점유율이 기간 중 88.8%에서 27.1%로 하향하였고, 대표적인 용량이 각각 60W, 15W로 제시하고 있어, 간단한 계산을 통해 동기간 조명부문의 에너지서비스의 효율개선이 연평균 약 5.5%였음을 확인할 수 있고, 각각의 평준화비용 산정이 가능한 정보가 제공되고 있다. 관련 상세 내용은 Yurnaidi 외(2015) 참조.

33) 지식경제부·에너지관리공단(2010)에는 백열구와 형광등의 점유율 비교자료에서 전체를 100으로 볼 때 1999년에는 백열구의 점유율이 88.8%이던 것이 2009년에는 37.1%로 하락하였음을 보여주고 있다. 제시하는 대표적인 백열전구(60W)와 형광등(15W)을 근거로 간단한 계산을 통해, 주어진 에너지서비스 요구량 100을 충족시키는 과정에서 필요로 하는 최종에너지의 변화를 통해 조명부문의 효율개선이 연평균 5.5%로 계산됨을 알 수 있다.

34) LED조명의 보급 비율은 LED 조명 2060 계획과 한국광산업진흥회(2014)의 보고서를 참고하여 2015년과 2020년의 LED 보급 비율은 LED 조명2060 계획을 참고하여 주어진 비용구조 및 효율에서 2015년 보급목표 30%와 2020년의 보급목표 60%에 수렴하는 것으로 설정하였다. 또, 조명효율과 관련하여서는 아래의 문헌들을 참고하였음을 밝힌다. Seo Jee-yeon, 2014, Korea to ban incandescent bulbs in 2014, Korean Herald, <http://www.koreaherald.com/view.php?ud=20130716000855>
Earth Easy, LED Light Bulbs: Comparison Charts, http://eartheasy.com/live_led_bulbs_comparison.html
Design Recycle Inc., Comparison Chart: LED Lights vs. Incandescent Light Bulbs vs. CFLs, <http://www.designrecycleinc.com/led%20comp%20chart.html>

〈표 4〉 시나리오 구성요소 입력값

변수 \ 연도			2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055
인구 (천명)			51,435	51,798	52,160	51,626	51,091	49,606	48,121	46,040
건물외피 효율강화 (U-value, GJ/m2-year℃)	기준	가정	0.989	0.964	0.94	0.916	0.892	0.869	0.847	0.825
		상업	0.999	0.976	0.954	0.932	0.910	0.889	0.868	0.848
	Adv	가정	0.964	0.928	0.894	0.862	0.830	0.799	0.770	0.742
		상업	0.966	0.931	0.897	0.864	0.832	0.802	0.772	0.744
	Low	가정	1.038	1.025	1.013	1.000	0.988	0.976	0.963	0.951
		상업	1.041	1.028	1.016	1.003	0.991	0.978	0.966	0.954

주. 인구출처는 통계청의 중위 시나리오, 18도 기준으로 계산결과 얻어진 난방도일은 4582.3
냉방도일은 3259.8로 산정된 값을 적용하였다.

냉난방에 관한 수요는 쾌적한 실내온도를 달성하기 위한 실내 난방 및 냉방의 연간 요구량인 냉방도일과 난방도일이다. 일반적으로 일평균기온과 기준온도 18°C의 차이를 일별로 누적하여, 일평균기온이 기준온도보다 높은 경우는 냉방도일로, 낮은 경우는 난방도일로 계산한다.³⁵⁾ 본 논문에서는 Maurer 외(2009)에 의거, 서울지역의 2004년~2006년의 3년간 시간대별 기온자료를 난방도일과 냉방도일을 산정하여, 적용하였음을 밝힌다.³⁶⁾

John Herman, Ultimate Light Bulb Test: Incandescent vs. Compact Fluorescent vs. LED,
<http://www.popularmechanics.com/technology/gadgets/tests/incandescent-vs-compact-fluorescent-vs-led-ultimate-light-bulb-test#slide-1>

35) 출처: 기상청 기상백과

$$36) HDD_m = \sum_{T=T_m-3\sigma_m}^{T=T_m+3\sigma_m} (18-T)f(T)D_m\Delta T, \text{ (if } T < 18),$$

$$CDD_m = \sum_{T=T_m-3\sigma_m}^{T=T_m+3\sigma_m} (T-18)f(T)D_m\Delta T, \text{ (if } T > 18)$$

$$\sigma_m = \sqrt{\sum_{day=1}^n (T_{day} - \overline{T_m})^2 / (n-1)}$$

여기서 $f(T)$ 는 $T_m \pm 3\sigma_m$ 내의 빈도를 나타내는 함수이며, D_m 은 해당월의 일수, ΔT 는 빈도산정시 설정한 온도의 한계단위이다. 최종적으로 사용된 년도별 냉난방도일은 각각

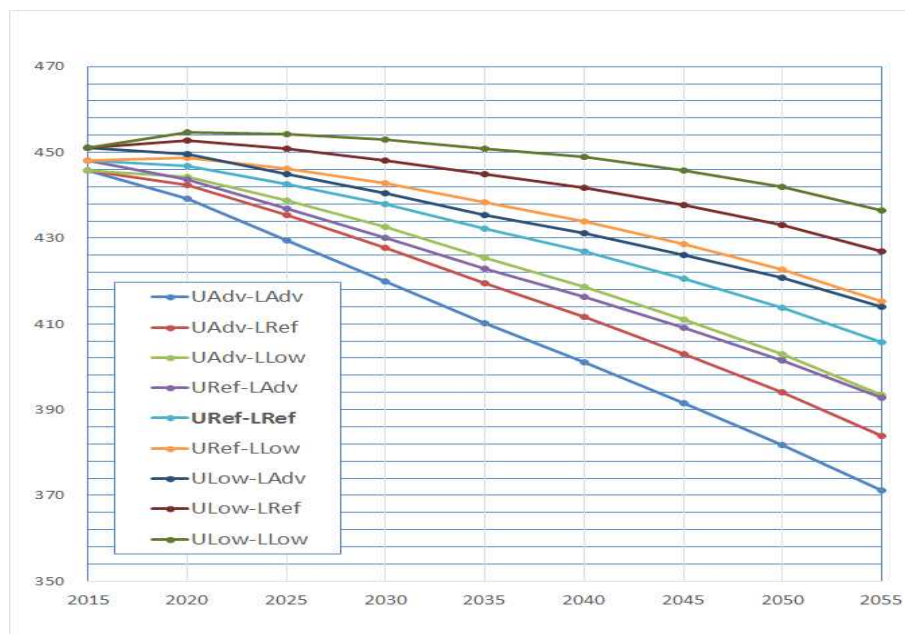
$$CDD_y = \sum_{m=1}^{12} CDD_m, HDD_y = \sum_{m=1}^{12} HDD_m \text{로 표시된다.}$$

Ⅲ. 실증분석 결과 및 평가

1. 시나리오분석 결과요약

9개 시나리오에 대한 분석은 결과는 편의상 아래의 그림으로 요약, 제시하였다. 결과로 제시되는 9개 경우의 그림에 대한 이름은 ‘건물외피효율-조명효율’의 조합으로 표시되어 있다. 예를 들어 ‘UAdv-LAdv’는 건물외피 효율개선 연 0.75%, 조명효율개선 및 LED 비용하락률이 각각 연2%, 3%인 시나리오를 말한다.

[그림 3] 단위면적당 1차 에너지 소비량 변화(2015~2055)



다음 절에서는 시나리오분석결과를 총체적으로 평가하여 이를 통해 추가 평가가 가능한 대형상업용 건물의 에너지 효율등급변화에 대해 우선 설명하고, 건물외피 효율 강화, 조명에너지 효율개선, 그리고 냉방온도규제 등 세 가지 시나리오 각각의 분석결과에 대해 시나리오별로 설명한다.

2. 시나리오별 분석결과와 검토 및 의의

2010년 기준 단위면적당 1차 에너지 소비량 463 kWh/m²은 평균적인 대형 상업용건물의 에너지효율등급은 인증기준으로 7등급에 해당한다. 건물효율등급기준 정보가 있는 <표 2>와 시나리오 분석결과에 대한 요약 정리한 <부표 4>를 참고하면 건물부문의 에너지소비에 영향을 미치는 외피효율과 조명의 효율이라는 단 두 가지 요인만을 시뮬레이션의 대상으로 삼았음에도 불구하고 그 결과는 통상의 예상을 초과하는 수준으로 그 효과가 크다는 것을 알 수 있다.

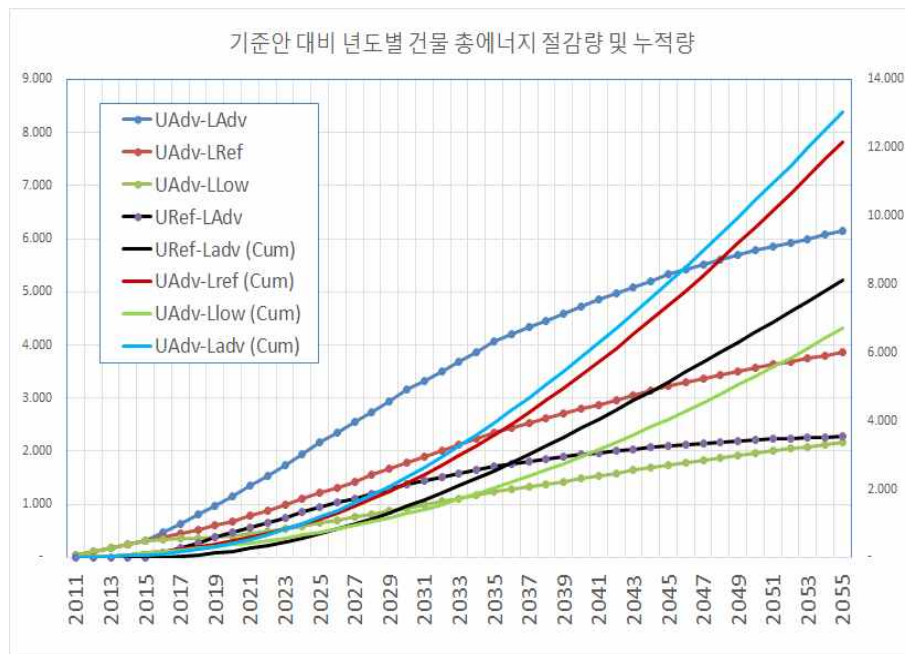
아래 그림은 개별 년도별 대형건물 총에너지 저감량(Bil. KWh)과 누적 절감량(MTOE)을 그림으로 표시한 것이다. 개별 년도의 저감량은 2020년, 2030년에 기준년도 소비량 대비 각각 4.9%, 13.3% 정도로 나타나지만, 누적량은 2030년에 2.36MTOE, 2055년에 13.04MTOE로 이는 기준년도 대형상업용건물 전체 소비량의 1.16배, 6.42배에 해당하는 엄청난 양이다. 각각 이러한 결과는 아주 요하게 보이지 않는 건물부문의 요인들도 장기적인 측면에서 효율개선을 유도하는 인센티브 구조를 동반하는 정책의 필요성을 보여준다고 하겠다.

이 효과를 외피효율강화와 조명효율의 개선의 측면에서 비교해 보면, 현재 주어진 시나리오 조건 하에서는 건물외피 효율강화의 효과가 조명의 효과에 비해 에너지저감 누적량 측면에서 좀 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

한편, 두 가지 요인의 변화를 통한 대형건물부문의 단위 면적당 개선효과 추이를 기준년도의 대형건물 효율등급 분포자료와 함께 연계하는 경우, 건물

부문의 효율개선이 등급변화를 어떻게 가져다 줄 것인지에 대해 상세히 평가할 수 있겠으나 지면 관계로 생략한다.

[그림 4] 기준안 대비 년도별 건물 총에너지 절감량 및 누적량
(단위: Bil. kWh, MTOE)



3. 건물외피 효율강화효과

건물외피 효율강화의 효과는 기준시나리오에 대비한 시나리오간 결과의 차이를 통해 확인해 볼 수 있다. <부표 5>에 정리되어 있는 내용을 통해 외피 비율(U)과 조명효율(L)에 대한 Adv, Ref, Low 시나리오의 조합과 기준시나리오간(URef-LRef)의 차이가 제시되어 있다.

먼저, 건물외피의 효율강화 효과만을 살피기 위해서는 조명의 효과가 고정

된 상태에서 평가된 시나리오들, 즉 UAdv-LRef, URef-LRef, ULow-LRef 시나리오들을 검토하게 되는데, 이 중 가운데 시나리오는 기준 시나리오에 해당되므로 다른 두 시나리오를 검토하게 된다.

UAdv-LRef와 기준안의 차이에 의하면, 단위면적당 1차 에너지 소비는 기준안 대비 2035년, 2055년까지 단위 면적당 각각 12.8, 21.8kWh/m² 감소하며, 기준년도 대비 각각 년평균 0.30%, 0.44%씩 감소하는 효과를 나타내고 있다. 또 2035년, 2055년까지 기준안 대비 1차 에너지 누적 저감량은 약 1.40MTOE, 7.83MTOE에 해당하는 것으로 나타났다.

한편, ULow-URef와 기준안의 차이에 의하면, 단위면적당 1차 에너지 소비는 기준안 대비 2035년, 2055년까지 단위 면적당 각각 12.6, 21.2kWh/m² 증가하며, 기준년도 대비 각각 년평균 0.07%, 0.21%씩 감소하는 효과를 나타내어 위의 고효율 시나리오에 비해 에너지효율개선 속도가 상대적으로 많이 느리게 나타남을 알 수 있다. 또 2035년, 2055년까지 기준안 대비 1차 에너지는 누적으로 약 2.14MTOE, 11.37MTOE 증가하는 것으로 나타났다.

4. 조명효율 개선효과

건물외피 효율강화 효과를 분석할 때와 마찬가지로 기준시나리오 대비 비교 시나리오와의 차이를 통해 그 효과를 확인해 볼 수 있으며, 조명효율 개선 효과만을 점검하기 위해 건물외피 효율강화 관련(U)의 기준시나리오인 URef로 고정시킨 상태에서 LAdv, LLow, 즉 URef-LAdv, URef-LLow와 기준안인 URef-LRef와의 차이를 점검하는 것이다.

URef-LAdv단위면적당 1차 에너지 소비는 기준안 대비 2035년, 2055년까지 단위 면적당 각각 9.4, 12.9kWh/m² 감소하며, 기준년도 대비 각각 년평균 0.29%, 0.37%씩 감소하는 효과를 나타내고 있다. 또 2035년, 2055년까지 기준안 대비 1차 에너지 누적 저감량은 약 0.96MTOE, 5.22MTOE에 해당하는 것

으로 나타났다.

한편, URef-LLow와 기준안의 차이에 의하면, 단위면적당 1차 에너지 소비는 기준안 대비 2035년, 2055년까지 단위 면적당 각각 6.1, 9.5kWh/m² 증가하며, 기준년도 대비 각각 년평균 0.11%, 0.27%씩 감소하는 효과를 나타내어 위의 고효율 시나리오에 비해 에너지효율개선 속도가 상대적으로 많이 느리게 나타남을 알 수 있다. 또 2035년, 2055년까지 기준안 대비 1차 에너지는 누적으로 약 0.57MTOE, 3.52MTOE 증가하는 것으로 나타났다.

이와 같은 에너지 소비량 변화는 LED의 효율향상과 비용하락 추세로 인한 것으로 이는 아래 표를 통해 확인할 수 있다. 2055년 LED의 시장 점유율은 LAdv시나리오에서 약 100%, LRef시나리오에서는 약 98%, LLow시나리오에서는 약 93%에 해당한다. 상대적으로 LED의 점유율이 낮은 경우에는 형광등의 점유율이 상대적으로 높게 나타난다는 것을 아래 표를 통해 확인할 수 있다.

〈표 5〉 에너지소비량 측면에서 본 조명기술의 시장점유율 변화

연도	LAdv			LRef			LLow		
	형광등	백열등	LED	형광등	백열등	LED	형광등	백열등	LED
2015	61.46	0.01	38.54	67.09	0.01	32.90	70.50	0.01	29.49
2020	42.14	0.01	57.85	54.35	0.01	45.65	62.03	0.01	37.96
2025	13.94	0.01	86.05	25.28	0.01	74.71	35.31	0.02	64.67
2030	3.07	0.00	96.93	7.79	0.01	92.20	13.82	0.02	86.16
2035	1.81	0.00	98.19	5.91	0.01	94.08	12.30	0.02	87.68
2040	1.05	0.00	98.95	4.44	0.01	95.56	10.87	0.02	89.12
2045	0.61	0.00	99.39	3.26	0.00	96.74	9.55	0.01	90.44
2050	0.35	0.00	99.65	2.41	0.00	97.59	8.35	0.01	91.64
2055	0.20	0.00	99.80	1.77	0.00	98.22	7.26	0.01	92.73

IV. 결론

본 논문은 GCAM모형에 기반하여, 에너지총조사와 선행연구를 바탕으로 건물-에너지원-에너지서비스별 에너지소비량을 구분, 이를 상세자료 획득이 가능한 범위 내에서 update한 GCAM-EML을 도구로, 대형상업용건물의 에너지효율개선에 영향을 주는 건물외피 효율 강화, 조명에너지 효율개선의 두 가지의 요인에 대해 총 9개의 세부 시나리오에 대한 분석을 진행하였다. 이들 시나리오 분석결과를 통해 예상되는 효율개선을 통해 국내 대형상업용 건물의 효율개선이 건물효율 등급제 등에 어떤 정도의 효과를 갖게 될 것인지를 평가할 수 있는 틀도 제시하였다. 여러 효율개선 정책 중 선택된 두 가지 요인만에 대한 시나리오 분석으로부터 얻어진 결과는 장기적으로 볼 때, 통상적인 이해 수준을 벗어나는 매우 커다란 영향력을 갖는다는 것을 살펴보았다. 이를 통해 장기적인 측면에서 효율개선을 유도하는 인센티브 구조를 동반하는 정책의 필요성 또한 명확히 보여주었다고 하겠다.

본 연구자들이 제시하고 있는 GCAM-EML 모형이 완벽할 수는 없다. 예를 들면, 건물외피 효율강화와 관련된 구체적인 공학적, 경험적 자료가 충분하지 않고, 건물면적이 어떤 수준으로 어느 시점에 포화상태에 이를 것일지에 대한 전제 등이 그 중 몇몇 사례가 될 것이다. 전자는 관련분야의 연구가 진척됨에 따라 추가 정보가 확인될 수 있는 부분일 뿐 아니라, 현재 어느 정도의 현실과 차이가 있더라도 식 내의 다른 상수값, 예를 들면 식(1)의 $k_{s,t}$, 과 같이 기준년도 calibration과정에서 최소화될 수 있는 메카니즘도 마련되어 있다는 점을 지적하고자 한다. 후자의 경우는 불확실한 미래에 대한 평가를 해야하는 분야의 연구에 공통적으로 적용되는 문제일 뿐 아니라 궁극적인 해결방안은 없다. 다만, 관련분야의 문헌과 연구가 제시하는 미래의 예상(pathway)을 기

준안(Reference)으로 삼되, 예상되는 불확실성을 다양한 시나리오를 통해 민감도분석으로 접근하는 것이 여러 방안 중 하나이다. 그럼에도 불구하고, 건물부문의 에너지효율개선을 위한 관련 특정 정책이, 어떤 부문에서 어떤 효과를 어떤 형태로 갖게 될 것인지에 대해 미리 평가함으로써 정책을 수립함에 다양한 정보를 제공하게 될 것이며, 훨씬 더 유용하고 생산적인 모형이 제시되기까지 여러 측면에서 활용할 수 있는 장점이 있다.

GCAM-EML을 이용한 분석의 응용범위는 매우 넓고 다양하다. 다만, 국내 에너지시스템 부문뿐만이 아니라 전 세계의 에너지, 환경, 토지, 산림, 지구온난화 등의 모듈이 모두 통합된 광범위한 모형연구는 다양한 전문분야의 연구자들의 관심과 지속적인 연구 진행이 필요하다는 점을 지적한다.

접수일(2015년 8월 27일), 수정일(2015년 11월 23일), 게재확정일(2015년 11월 27일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 관계부처합동. 2014. 제5차 에너지이용합리화 기본계획(안).
- 국가법령정보센터. 건축물의 설비기준등에관한규칙 [별표 4] 지역별건축물부위의열관류율표
- 국토교통부. 2012. 건축물의 에너지절약 설계기준, 국토교통부 고시 제2012-1473호.
- _____. 2013a. 2013년 건축물 현황 통계자료.
- _____. 2015. 건축물 에너지효율등급 인증현황('15년 1/4분기), 국토교통부 사전공표정보 게시판.
- _____. 2013b. 건축물 에너지효율등급 인증기준, 국토교통부고시 제2013-248호.
- 방영현, 강아람, 박효순, 서승직. 2012. "건물에너지효율등급 제도를 이용한 시나리오별 목표 온실가스 저감방안에 관한 연구", 한국생태환경건축학회 논문집, Vol. 12, No. 3.
- 산업통상자원부. 2015. 2014년도 에너지총조사 보고서
- 에너지경제연구원. 2014. 건물 에너지효율 시장요소 분석 및 개선방안 연구, 기본연구보고서 2014-16 .
- 에너지경제연구원. 2013. 에너지통계연보.
- 에너지관리공단. 에너지성능평가프로그램, http://www.kemco.or.kr/building/v2/buil_cert/buil_cert_4_1.asp.
- _____. 건물에너지절약사업, <http://www.kemco.or.kr/building/v2/>.
- 이성근. 2010.가정부문 용도별 에너지사용량 및 소급추정에 관한 연구, 에너지경제연구원 기본연구보고서 10-05.
- 지식경제부. 2012. 2011년도 에너지총조사 보고서.
- 지식경제부·에너지관리공단. 2010. 에너지라벨링제도 이해.
- 최문선. 2012. IEA기준 상업 및 가구부문의 에너지효율지표 작성을 위한 기초통계 추정연구, 에너지경제연구원 기본연구보고서 12-09.

- 통계청. 2011. 장래인구추계: 2010년~2060년, 보도자료 2011.12.7.
- 한국광산업진흥회. 2014. 조명기기 이용실태 조사 및 조명전력 절감방안 연구보고서.
- Brenkert AL, SH Kim, AJ Smith and HM Pitcher. 2003. Model Documentation for the MiniCAM. PNNL-14337.
- Chaturvedi, Vaibhav, Jiyong Eom, Leon E. Clarke and Priyadarshi R. Shukla. 2014. "Long term building energy demand for India: Disaggregating end use energy services in an integrated assessment modeling framework". Energy Policy Volume 64 : pp226 - 242.
- Clarke, John F., J.A. Edmonds 1993. "Modelling energy technologies in a competitive market" Energy Economics. Volume 15. Issue 2. Pages 123-129
- Eom, J.. 2013. Introduction to the GCAM's Building Energy Model. presented at Ajou University.
- Eom, J., GP Kyle, LE Clarke, PL Patel, and SH Kim. 2012. China's Building Energy Use: A Long-Term Perspective based on a Detailed Assessment. Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-21073.
- Energy Modeling Lab. 2014. Documentation of Building Sector in Global Change Assessment Model. Ajou University
- GCAM Buildings. <http://wiki.umd.edu/gcam/index.php/Buildings>
- GCAM wiki homepage. https://wiki.umd.edu/gcam/index.php/Main_Page
- Intergovernmental Panel on Climate Change(IPCC). 2007. Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [B. Metz, O.R. Davidson, P.R. Bosch, R. Dave, L.A. Meyer (eds)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- International Energy Agency(IEA). Beyond 2020 Professional Browser.
_____. 2011. 25 Energy Efficiency Policy Recommendations
2011 Update
- Joint Global Change Research Institute(JGCRI) / Pacific Northwest National

- Laboratory(PNNL). 2014. "GCAM 4.0 source code". available at:<http://www.globalchange.umd.edu/models/gcam/download/>
- Kyle, Page and Son H. Kim. 2011. "Long-term implications of alternative light-duty vehicle technologies for global greenhouse gas emissions and primary energy demands". Energy Policy Volume 39 Issue 5. pp3012-3024.
- Kyle, Page. 2010. Documentation of GCAM Calibration. Pacific Northwest National Laboratory internal material.
- Maurer EP, Adam JC, Wood AW, 2009, Climate model based consensus on the hydrologic impacts of climate change to the Rio Lempa basin of Central America. Hydrol Earth Syst Sci 13 (2):183-194. doi:10.5194/hess-13-183-2009
- Mishra, Gouri Shankar, Jacob Teter, Geoffrey M. Morrison, Sonia Yeh, Page Kyle and Son H. Kim. 2013. Transportation Module of Global Change Assessment Model (GCAM) Model Documentation - Version 1.0. Institute of Transportation Studies at University of California, Davis, Research Report - UCD-ITS-RR-13-05.
- OECD/IEA. 2005. Energy Statistics MANUAL.
- Scott, MJ, RH Moss, DS Daly, PL Patel, J Hathaway, MJ Peterson, CS Lansing, JS Rice, Y Liu, Y Zhou, HC McJeon. 2014. Calculating Impacts of Energy Standards on Energy Demand in U.S. Buildings under Uncertainty with an Integrated Assessment Model: Technical Background Data, Pacific Northwest National Laboratory. PNNL-23918.
- United Nations Environment Programme Sustainable Buildings and Climate Initiative. Why Buildings. available at: <http://www.unep.org/sbci/AboutSBCI/Background.asp> accessed: 2015.08.03.
- Wise, Marshall, G. Page Kyle, James J. Dooley, and Son H. Kim. 2010. "The impact of electric passenger transport technology under an economy-wide climate policy in the United States: Carbon dioxide emissions, coal use, and carbon dioxide capture and storage". International Journal of Greenhouse Gas

Control Volume 4 Issue 2. pp301-308.

Yurnaidi, Zulfikar, 백민호, 오재익, 김수덕. 2015. "Analysis of Buildings Lighting Technological Change and Its Impact on the Energy System". 2015 경제학공동 학술대회 한국자원경제학회 제 3 분과회의 B, 연세대 대우관 별관 B103. 2015.2.24. 15:00~16:30.

Yu, Sha, Jiyong Eom, Yuyu Zhou, Meredydd Evans and Leon Clarke. 2014. "Scenarios of building energy demand for China with a detailed regional representation". Energy Volume 67. pp284 - 297.

Yu, Sha, Jiyong Eom, Yuyu Zhou, Meredydd Evans and Leon Clarke. "A long-term, integrated impact assessment of alternative building energy code scenarios in China". Energy Policy, Volume 67 issue C. pp626-639.

Zhou, Yuyu, Leon Clarke, Jiyong Eom, Page Kyle, Pralit Patel, Son H. Kim, James Dirks, Erik Jensen, Ying Liu, Jennie Rice, Laurel Schmidt and Timothy Seiple. 2014. "Modeling the effect of climate change on U.S. state-level buildings energy demands in an integrated assessment framework". Applied Energy 113. pp1077 - 1088.

Zhou, Yuyu, Jiyong Eom, Leon Clarke. 2013. "The effect of global climate change, population distribution, and climate mitigation on building energy use in the U.S. and China". Climatic Change, Volume 119, Issue 3, pp 979-992.

< 부 록 >

〈부표 1〉 에너지총조사 부문별 에너지 소비량

	2004		2007		2010		증가율		
	천TOE	구성비(%)	천TOE	구성비(%)	천TOE	구성비(%)	04-'07	07-'10	04-'10
산업	87,613	55.3	98,544	57.3	103,017	56	3.919	1.480	2.699
수송	37,318	23.5	39,790	23.2	41,900	22.8	2.138	1.723	1.930
가정	20,685	13.1	18,885	11	21,924	11.9	-3.035	4.973	0.969
상업공공	12,912	8.1	14,646	8.5	17,071	9.3	4.200	5.107	4.653
합계	158,529	100	171,865	100	183,912	100	2.692	2.258	2.475

〈부표 2〉 GCAM과 GCAM-EML의 모형 세분화

구분	GCAM		GCAM-EML		
	세부분문	에너지서비스	세부분문	에너지서비스	에너지서비스 공급기술 (Generic Technology)
건물부분	주거 용 건물	난방, 냉방, 기타	단독주택, 아파트, 연립주택, 다세대주택,	난방, 냉방, 조명, 조리, 가전 및 기타	보일러 (가스, 석유, 전기), 에어컨, 조명 (형광등, 백열등, LED), 조리 (가스, 석유, 전기) 가전(냉장고, 컴퓨터, 전기밥솥, TV, 세탁기, 기타)
	상업 공공 건물	난방, 냉방, 기타	상업중소 형 및 공공건물	난방, 냉방, 동력, 조명, 조리 및 기타	보일러 (가스, 석유, 전기), 에어컨, 조명 (형광등, 백열등, LED), 조리 (가스, 석유, 전기), 동력 (전기) 등
			대형건물	난방, 냉방, 급탕, 설비, 조명, 기기 및 기타	
산업 부분	산업	절소비료, 시멘트, 산업용 에너지 소비, 산업용원료, 시멘트 열공정	좌동		
수송 부분	항공	수송에너지, 수송인원, 수송량 등			
	화물				
	여객				
	해운				

〈부표 3〉 $PE/m^2 > 2000kWh$ 이상 제외된 표본의 내용(2011년 기준)

	조사대상 고유번호	건물특징	PE/m ² (kWh)
1	20417	통신센터	12,062
2	20144	11	9,267
3	20418	11.통신센터	9,078
4	20459	인터넷데이터센터	8,848
5	20421	24.IDC전산센터	7,298
6	20581	24	6,822
7	20230	전산센터	6,203
8	20467		5,496
9	20179	전산센터	5,227
10	20810		4,814
11	20204	전산(백업)센터	4,421
12	20216	21.데이터센터	4,213
13	20858	21.데이터센터(정부통합전산센터)	4,027
14	20739	24.숙박	3,580
15	20853		3,149
16	20679		3,118
17	20196	11	3,053
18	20364	전산실	3,050
19	20431	전산센터	2,907
20	20828	11	2,803
21	20140		2,506
22	20435		2,496
23	20357	11	2,445
24	20270		2,429
25	20666		2,417
26	20242		2,403
27	20083		2,380
28	20203	11.전산센터	2,350
29	20597		2,294
30	20536	24.1F생산설비,2F자재창고,군데군데사무실	2,168
31	20234		2,086
32	20446	11	2,086
33	20644	21.IDC데이터센터	2,025

주: 건물특징에 대한 정보가 비어 있는 부분은 현재로서는 확인이 되지 않지만, 33번째의 건물이 IDC 데이터센터임에 주목함.

〈부표4〉 시나리오별 단위면적당 1차에너지(kWh/m²) 저감효과

	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050	2055	GrowthRate		1차에너지누적저감량 (백만TOE)	
										'15-'35	'35-'55	2030까지	2055까지
UAdv-URef	446	439	429	420	410	401	391	382	371	-0.42%	-0.50%	2.36	13.04
URef-ULow	446	442	435	428	419	412	403	394	384	-0.30%	-0.44%	1.40	7.83
UAdv-ULow	446	444	439	433	426	419	411	403	394	-0.23%	-0.39%	0.83	4.31
UAdv-URef	448	444	437	430	423	416	409	402	393	-0.29%	-0.37%	0.96	5.22
URef-ULow	448	447	443	438	432	427	421	414	406	-0.18%	-0.32%	0.00	0.00
UAdv-ULow	448	449	446	443	438	434	429	423	415	-0.11%	-0.27%	-0.57	-3.52
UAdv-URef	451	450	445	440	435	431	426	421	414	-0.18%	-0.25%	-0.61	-2.64
URef-ULow	451	453	451	448	445	442	438	433	427	-0.07%	-0.21%	-1.57	-7.85
UAdv-ULow	451	455	454	453	451	449	446	442	436	0.00%	-0.16%	-2.14	-11.37
시나리오간최대차이	5	15.4	24.8	33.2	40.8	47.9	54.3	60.2	65.4	2030년 효율개선	2055년 효율개선	2010년 대비	
UAdv-URef	2.4	7.8	13.2	18.0	22.2	25.8	29.1	32.0	34.6	4.1%	8.5%		
URef-ULow	2.4	4.6	7.4	10.2	12.8	15.2	17.6	19.8	21.8	2.3%	5.4%		
UAdv-ULow	2.4	2.7	3.9	5.4	6.7	8.1	9.6	10.9	12.2	1.2%	3.0%		
UAdv-URef	0.0	3.2	5.8	7.8	9.4	10.6	11.5	12.3	12.9	1.8%	3.2%		
URef-ULow	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0%	0.0%		
UAdv-ULow	0.0	-1.8	-3.4	-4.9	-6.1	-7.1	-8.1	-8.8	-9.5	-1.1%	-2.4%		
UAdv-URef	-2.8	-2.6	-2.3	-2.5	-3.2	-4.3	-5.5	-7.0	-8.3	-0.6%	-2.0%		
URef-ULow	-2.8	-5.9	-8.2	-10.3	-12.6	-14.9	-17.1	-19.3	-21.2	-2.4%	-5.2%		
UAdv-ULow	-2.8	-7.7	-11.6	-15.2	-18.6	-22.1	-25.1	-28.1	-30.7	-3.5%	-7.6%		

ABSTRACT

Analyzing the Long-Term Impact of Energy Efficiency Improvement Programs on Large Commercial Buildings Using GCAM-EML

MinHo Baek*, Zulfikar Yurnaidi**, Jaeick Oh*** and SuDuk Kim****

While various energy efficiency improvement programs with specific energy saving targets are being proposed by governments, the feasibility of those programs and targets are properly assessed in quantitative manner. This research focuses on the enhanced building shell efficiency, efficiency improvement of lighting appliances to reduce cooling energy demand via 9 scenarios discussed in this article using GCAM-EML.

Provided in this process of research are quantification of such policy impacts on energy system through scenario simulation results. The results show that this energy efficiency of large buildings are evaluated to be improved at maximum of 4.1% and 8.5% by 2030 and 2055 compared to the reference case. Although this improvement does not seem be large enough, it should be noted that the cumulative energy savings up to 2030 is estimated to be 2.36MTOE and it is 1.16 times of large commercial building energy consumption of 2010 reported by energy survey conducted on 2011.

A further detailed research with a more realistic scenarios would better describe how various energy efficiency improvement programs currently deployed affect the overall building's energy efficiency in the future, and this information could be better utilized for the detailed design of various ongoing energy efficiency programs.

Key Words : Building Energy Labels or Certificates, Large Commercial Building, Energy Consumption Survey, Energy Efficiency, GCAM-EML

* Ph.D Candidate, Department of Energy Systems Research, Ajou University (main author). minhobaek83@gmail.com

** Ph.D Candidate, Department of Energy Systems Research, Ajou University. viczhoel@yahoo.com

*** Research Professor, Department of Energy Systems Research, Ajou University. jaeickoh@gmail.com

**** Professor, Department of Energy Systems Research, Ajou University (corresponding author). suduk@ajou.ac.kr