

냉난방전력 수요자원의 경제적 가치 분석*

장지연** · 전우영***

요 약

전력사용량이 매년 빠르게 증가하고 재생에너지 기반 전력공급환경으로 전환되면서 전통적인 공급관점방식의 수급관리는 어려움에 봉착하고 있다. 이에 수요관점에서의 해결책에 대한 관심이 증대되면서 피크수요 감축잠재력이 높은 냉난방수요의 중요성이 높아지고 있다. 본 연구에서는 계량모형을 이용해 시간별 전력수요에서 냉난방전력수요를 분리추정하고 이를 토대로 냉난방수요자원이 최적으로 활용될 경우 전력공급비용경감에 얼마나 큰 영향을 미치는지 분석하였다. 분석결과 여름철과 겨울철의 피크 수요일에 냉난방수요의 비중은 약 19.6~33.6%이며 그 중 피크시간의 비중은 약 25.8%~37.7%에 달하는 것으로 분석되었다. 냉난방수요자원을 최적으로 활용하여 전력시스템을 운영할 경우 전체 전력공급비용이 약 0.8%~2.5%가 경감되는 것으로 분석되었다. 냉난방수요자원의 비용경감효과는 발전비용보다는 피크수요 감축에 의한 용량비용에서 크게 나타났다. 또한 냉난방 수요자원의 가치는 수요반응시장에 대한 참여율이 하락하는 영향보다는 수요반응의 효율하락에 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다.

주요 단어 : 냉난방전력수요, 수요자원, 가상발전소, 스마트그리드, 전력공급비용
경제학문헌목록 주제분류 : Q41

* 이 논문은 2019년 대한민국 교육부와 한국연구재단의 인문사회분야 신진연구자지원사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2019S1A5A8033056)

** 전남대학교 경제학부 석사과정(주저자)

*** 전남대학교 경제학부 부교수(교신저자), wyjeon@jnu.ac.kr

I. 서 론

1. 연구 배경 및 동기

2011년 9월 15일 예상하지 못했던 늦더위에 사상 초유의 전국적인 정전사태가 발생하면서 공급예비율과 같은 안정적인 전력공급 지표에 국민적인 관심이 모아진 적이 있었다. 이후 혹서기나 혹한기를 동반하는 해에는 어김없이 공급예비율이 뉴스에 등장해서 실내온도를 과도하게 설정하는 것을 지양하고 전력사용을 자제하는 캠페인을 하곤 한다. 2011년의 정전사태는 공급 적정성을 확보하지 못한 것이 아니라 초가을 늦더위를 예측하지 못하고 원자력발전 예방정비에 들어 가버린 인재였지만 이는 이상기온현상시 발생하는 비약적인 냉난방전력수요가 안정적인 전력공급에 얼마나 큰 문제를 야기시키는지 보여주는 좋은 예였다.

2011년 부주의한 운영으로 정전사태를 겪긴 했지만 전통적으로 한국의 전력시장은 효율성관점보다는 안정성관점에 초점을 맞추어 운영되어 왔다. 안정적인 전력공급을 위해서 매년 2년 단위로 갱신되는 전력수급계획에서는 향후 15년간의 전력수요 추정을 통해 공급의 적정성(adequacy)을 유지할 수 있는 발전용량을 확보하는 것이 핵심적인 내용이다.(산업통산자원부 (2017)) 즉 수요는 크게 관리할 수 없는 주어진 문제로 보고 원자력발전소, 석탄화력발전소, 대규모 송전설비 등과 같이 공급관점 중심으로 전력시장 문제해결에 노력을 기울여 온 것이다.

하지만 철도, 냉난방, 자동차 등 기존에 화석연료를 사용하던 서비스들이 전력화(electrification)되고, 낮은 산업용 전력가격과 에너지집약적인 산업구조로 인해 전력시장의 규모가 경제성장률 이상으로 가파르게 증가하면서, 거대

해진 전력시장에서 공급의 적정성을 공급관점에서만 해결하는 것은 매우 비용 비효율적인 해결책이 되고 있다. (Jeon et al. (2015a), Crampton et al. (2013)). 또한 변동성 재생에너지(Variable Renewable Energy, VRE)의 보급이 빠르게 증가하면서 VRE의 변동성과 불확실성에 대한 유연성자원이 추가로 요구되어 공급관점의 해결책은 한계에 도달하고 있다.(Cometto(2019), Jeon et al. (2015b), Ueckerdt et al. (2013))

이러한 문제의식 속에 수요관점의 해결책에 대한 관심과 필요가 증가하고 있다. 2014년 11월 수요자원(Demand Response, DR) 거래시장이 개설되어 11개사업자 1550MW에서 2018년 10월 기준 22개 사업자 4,116MW 규모로 규모가 빠르게 증가하고 있다. DR 시장은 크게 피크감축 DR과 요금감축 DR, 두가지 프로그램으로 구성되어 있는데, 그 중 전력시스템의 고질적인 문제인 혹한기 혹은 혹서기의 피크수요경감이 주목적인 피크감축 DR이 핵심 프로그램이다. 피크감축 DR은 최대 연간 60시간 발령이 가능한데 감축지시가 발령 되면 1시간 이내에 약속된 발전량을 삭감해야 한다. 이럴 경우 피크감축 DR에 등록된 용량만큼 용량요금을 정산받는다. 이는 일년 8760시간 중 이상기온으로 인해 약 60시간만 발생하는 피크를 만족시키기 위해서 건설되어야 하는 LNG 발전소 건설을 대체해주기 때문에 전체 전력공급 효율성 관점에서는 매우 합리적이고 효과적인 정책이다.

수요자원 거래시장을 시작으로 해서 수요자원을 탄력적으로 활용하려는 시도는 국내외에서 많이 검토되고 있다. 공장과 같은 대규모 전력수요자만 참여 가능한 현행 수요자원 거래시장에 참여하지 못하는 소규모 소비자들은 실시간 요금제(Real-time pricing)나 계시별 요금제(Time-of-Use)와 같은 동적요금제(dynamic pricing)가 도입될 경우 충분한 유인을 담은 가격체계가 제공된다면 수요의 탄력적인 반응을 유도할 수 있고 이를 통해 피크수요이전을 이끌어 낼 수 있다.

앞서 언급한 2011년 정전사태에서 알 수 있듯이 전력수요가 비약적으로 급증하는 현상은 매해 혹한기와 혹서기에 발생된다. 이는 냉난방에 사용되는 전

력수요가 상당하며 특히 전력공급 안정성에 큰 문제를 야기하는 피크수요는 대부분 냉난방수요와 관련이 있음을 의미한다. 냉난방 전력수요는 사용의 적시성 때문에 수요를 다른 시간으로 이전하는 것이 쉽지는 않지만 동적요금제 등의 제도를 도입한다면 지금과 같은 고정요금제 대비해서는 충분히 수요를 탄력적으로 변화시킬 수 있는 유인이 제공될 수 있다.

전력수요의 비탄력성에 대해 언급할 때 자주 이야기 되는 것이 실시간 요금제나 계시별 요금제를 통해 가정용 소비자에게 제공할 수 있는 보상의 크기가 소비자 행동변화를 유발할 만큼 크지가 않아서 수요반응이 쉽게 일어나지 않는다는 것이다. 하지만 최근에는 원격제어와 AI기술이 발전하면서 소비자 행동이 필요하지 않는 수요반응 서비스들이 개발되고 있다. Google에서 출시한 지능형 온도제어기(smart thermostat)인 Nest는 사람들의 생활패턴과 실시간요금을 반영해서 최적으로 실내온도 설정을 해준다. 우리나라에서도 최근에 출시된 삼성에어컨은 사용자와 중개거래사업자와의 사전 계약을 통해서 사용자가 불편함을 느끼지 않는 범위 내에서 중개거래사업자가 에어컨전력수요 제어를 하고 거기에서 발생하는 수익을 사용자와 공유하는 사업을 실시하고 있다. 사이버 물리망을 이용해 분산되어 있는 냉난방 수요자원들을 중개거래사업자가 통합해서 가상발전기(virtual power plant) 형태로 활용성을 극대화 하는 것이다.

뿐만아니라 실시간 요금제나 임계피크요금제(critical peak pricing, CPP)를 통해 피크시간과 비피크시간의 가격격차를 충분히 크게 만들 경우 냉난방 저장장치(thermal storage)를 활용하는 적극적인 수요반응 사례가 증가하고 있다. 텍사스와 같이 더운 지방에 위치한 월마트(Walmart)의 경우 밤시간 값싼 전력을 이용해 냉매에너지를 저장해두었다가 낮의 혹서기 시간에 전력구매대신 저장된 냉매에너지를 활용해 냉방을 하는 시스템을 구축하고 있다. 이러한 냉난방 저장장치는 일반적인 리튬이온배터리보다 저렴하면서 효과적으로 피크시간의 냉난방수요를 이전시켜주기 때문에 경제성확보가 용이하다. (Jeon et al. (2015a), ThermalCUBE(2011), MacCracken(2010))

이렇듯 전력수요 중 냉난방 전력수요는 여름철과 겨울철 전력공급 안정성을 항상 위협하는 요소이면서 동시에 전체 수요 중 그 비중이 아주 높기 때문에 자원화해서 활용할 수 있을 경우 잠재적 가치가 매우 높은 요소이다.

2. 선행연구 분석

전력수요와 기온간의 관계를 살펴본 연구에는 Knaut and Palus(2016), 신동현, 조하현(2014a), 신동현, 조하현(2014b), 임현진 외(2013), Mo(2012) MORAL-CARCEDO et al. (2005) 등이 있다. Knaut and Palus(2016)에서는 독일의 전력수요, 가격, 풍력 발전 및 기온에 대한 자료를 기반으로 냉난방수요를 포함 수요자원들의 가격 탄력성을 추정하였다. 신동현, 조하현(2014a)에서는 최대전력소비와 기온, 상대습도, 풍속, 불쾌지수, 체감온도 등과 같은 기상변수들 사이에 비선형관계가 존재하며 이를 활용할 경우 더욱 효율적인 전력수급관리가 가능함을 보였다. 신동현, 조하현(2014b)는 기온의 연속 및 누적 효과를 이용하면 일일 최대전력수요 예측을 향상시켜 효율적인 전력수급관리가 가능함을 보였다. 임현진 외(2013)에서는 기후온난화가 가정부문 전력수요에 미치는 영향을 장단기로 나누어 분석하였는데 장기적인 영향이 더 큰 것으로 추정하였다. Mo(2012)에서는 미국 뉴욕주의 전력시장을 바탕으로 시간별 냉난방수요를 추정하고 냉난방수요자원의 편익을 분석하였다. 미국의 경우 피크시간과 비피크시간의 한계가격차이가 커서 실시간요금제 등의 동적요금제가 적용될 경우 냉난방수요가 비피크시간으로 이전될 수 있는 충분한 유인으로 작동할 수 있음을 보였다. MORAL-CARCEDO et al. (2005)는 기온이 스페인의 일별 전력수요 변동성에 미치는 영향을 비선형 모형을 적용하여 분석하였다.

수요자원을 활용하여 전력공급의 안정성과 효율성 개선을 살펴본 연구에는 Jeon et al.(2015a), Jeon et al.(2015b), Dyson et al.(2014), Bartusch et al.

(2011) 등이 있다. Jeon et al(2015a)에서는 미국자료를 바탕으로 대형건물에서 활용되는 냉난방용 저장장치(thermal storage)를 활용해서 전력시스템 운영을 최적으로 할 경우 피크수요 감축에 기여를 할 수 있으며 냉난방용 저장장치의 편익이 비용을 능가해서 경제성이 있는 것으로 분석되었다. Jeon et al(2015b)에서는 냉난방수요와 전기차 수요와 같은 수요자원은 풍력의 보급이 증가할 경우 변동성과 불확실성을 보완해 줄 수 있는 비용효율적인 유연성자원임을 보였다. Dyson et al.(2014)에서는 북 캘리포니아의 30000가구의 시간별 전력수요를 이용해서 분석한 결과 수요반응자원은 태양광 변동성에 대한 효과적인 유연성자원이 될 수 있으며, 소비자간 수요반응의 정도에 이질성이 큰 것으로 나타났다. Bartusch et al. (2011)는 계시별요금제를 기반으로 스웨덴의 가정용 전력소비자들의 수요반응에 대한 인식과 반응정도에 대해서 추정하였다. 분석결과 소비자들이 가격신호에 반응하여 피크수요경감에 상당부분 기여하는 것으로 나타났다.

본 연구에서는 피크수요의 핵심적인 원인이며 혹서기와 혹한기 고질적으로 전력공급 안정성에 문제를 유발하는 냉난방전력수요가 수요반응자원으로 활용될 경우 그 경제적인 가치를 추정하였다. 본 논문의 분석은 크게 두 부분으로 나뉜다. 첫 번째 부분은 시간별 전력수요에 기반한 계량분석을 통해 전체 전력수요 중 냉난방 전력수요의 규모를 추정하였다. 두 번째 부분은 앞서 추정된 시간별 냉난방수요 잠재량을 바탕으로 이 수요가 자원화되어서 VPP형태로 전력시스템 운영자에 의해 최적으로 활용될 경우 전력공급비용을 얼마나 경감시킬 수 있는지 분석하였다. 이 두 부분의 분석은 선행연구와 본 연구의 가장 두드러진 차별점으로 국내 시간별 전력수요를 이용해서 냉난방 전력수요를 분리 추정하고, 이 냉난방수요가 최적활용될 경우 발전비용과 용량비용 경감을 통해 가지는 경제적 가치를 분석한 연구는 기존에 없었다.

본 논문의 구조는 다음과 같다. 2장에서는 계량모형을 통해 육지와 제주의 시간별 전력수요에서 냉난방전력수요를 분리추정하는 방법론을 제시하고, 3장에서는 추정된 냉난방수요의 계절별 특징을 분석하였다. 4장에서는 최적화모

형을 통해 냉난방수요가 수요자원으로 활용될 경우 전력공급비용이 얼마나 경감되는지 분석하였다. 5장에서는 본 연구의 결론과 시사점에 대해서 요약하였다.

II. 냉난방전력수요 추정 모형

1. 전력수요 기초통계

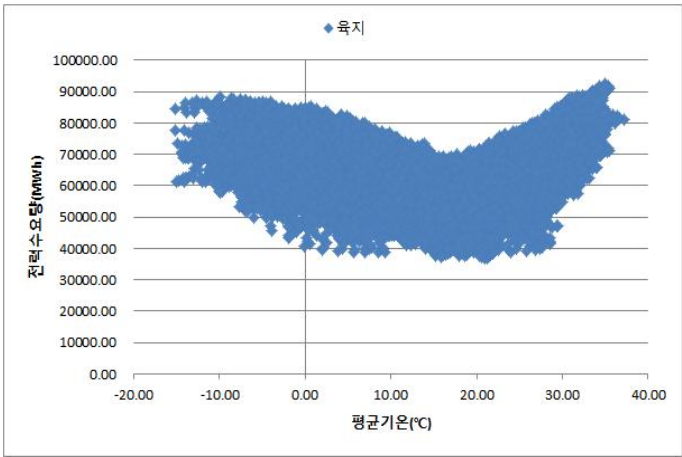
본 연구의 기초자료로 2014년부터 2018년까지 최근 5년간의 시간별 전력사용량과 16개 시·도지역의 기온자료를 사용하였다. 시간별 전력사용량은 전력거래소에서 제공되는 공급측면의 자료로 발전단 자료에 해당한다. 시간별 전력사용량은 각 시·도 단위까지 구분되어 있지는 않고, 육지와 제주로만 작성되어 있어서 육지와 제주도만 구분한 두 지역의 냉난방수요를 추정하였다. 육지의 전력사용량에 대응하는 기온은 제주도를 제외한 15개 시·도의 지역별 전력수요의 비중을 고려한 가중평균을 이용하였다.

[그림 1]은 최근 5년치 육지의 전력사용량과 기온간의 상관관계를 보여주고 있다. 일반적으로 전력사용량과 기온은 알파벳 브이 형태의 관계를 보이는데 18°C 지점을 기준으로 기온이 더 올라가면 전력수요가 증가하고, 기온이 더 내려가면 역시 전력수요가 증가하는 형태를 보여주고 있다. 따라서 전력사용량과 기온간의 직접적인 선형관계를 도출하는 것은 효과적이지가 않고, 냉방도일(Cooling Degree Day, CDD)¹⁾과 난방도일(Heating Degree Day, HDD)²⁾을 이용해서 냉방수요와 난방수요를 분리해서 추정하는 것이 일반적이다.(Jeon et al.(2015a), 임현진 외(2013), Mo(2012))

1) $CDD_t = \max(\text{temperature}_t - 24^\circ\text{C}, 0)$

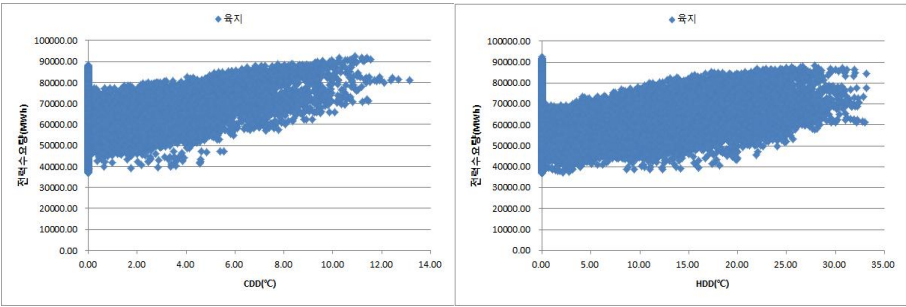
2) $HDD_t = \max(18^\circ\text{C} - \text{temperature}_t, 0)$

[그림 1] 육지의 전력수요량과 기온의 상관관계



[그림 2]는 육지의 전력수요를 냉방도일과 난방도일 각각에 대해서 상관관계를 나타낸 것이다. 앞서의 그림과 비슷한 형태로 비슷한 형태로 냉방도일과 난방도일이 각각 증가함에 따라 전력수요가 증가하는 양의 선형관계를 확인할 수 있다.

[그림 2] 육지의 전력수요와 냉난방도일과의 상관관계



(a) 냉방도일

(b) 난방도일

<표 1>은 2014-2018년 기간동안 우리나라 전력수요와 기온간의 기초통계량을 보여주고 있다. 5년간 육지의 평균 시간별 수요는 58,749MWh에서

64,480MWh로 증가했고 해당기간 증가율은 9.8%, 연평균 증가율은 약 2.4%이다. 제주도의 경우 522MWh에서 647MWh로 평균 수요가 증가했고 해당기간 증가율은 23.9%, 연평균 증가율은 5.5%로 육지 대비 2배 이상 높은 것으로 나타났다. 흥미로운 점은 육지와 제주 모두에서 CDD와 HDD가 꾸준히 증가하는 추세를 보이고 있다는 점이다. 육지의 CDD와 HDD는 해당기간 약 9.7%와 90.9% 증가했고, 제주의 CDD와 HDD는 약 5.7%와 107.1% 증가했다.

CDD와 HDD가 증가한다는 것은 해마다 아주 덥거나 아주 추운 날이 증가하고 있다는 것을 뜻한다. 온난화 현상과 함께 폭염, 폭한, 가뭄, 허리케인 등의 극단적인 날씨가 증가한다는 선행연구의 주장이 우리나라에서도 일정부분 적용될 수 있음을 알 수 있다. (De Sario et al.(2013), Vardoulakis et al.(2014)) CDD와 HDD가 매년 증가한다는 것은 기온에 의한 전력수요의 증가가 더 빠르게 나타날 수 있음을 뜻하며, 이는 냉난방 전력수요의 관리가 향후 전력공급을 효율적으로 하는데 있어서 더욱 중요한 요소임을 나타낸다고 할 수 있다.

〈표 1〉 전력수요와 기온간의 상관관계

년도	육지 평균 시간별 수요 (MWh)	제주 평균 시간별 수요 (MWh)	육지 시간별 기온 (℃)		제주 시간별 기온 (℃)		육지 CDD	육지 HDD	제주 CDD	제주 HDD
			Max	Min	Max	Min				
2014	58,749	522	33.1	-9.6	32.8	0.4	57,705	3,658	33,111	3,044
2015	59,445	546	34.4	-10.7	32.6	-0.3	55,867	4,339	31,333	3,335
2016	61,057	583	35.0	-15.0	32.6	-5.2	58,090	5,982	33,000	5,864
2017	62,564	618	34.7	-10.3	33.9	0.0	61,694	5,109	35,607	7,284
2018	64,480	647	37.2	-15.2	32.9	-2.4	63,314	6,984	35,004	6,307

2. 냉난방수요 추정 계량모형

전체 시간별 전력수요에서 냉난방 전력수요를 분리 추정하기 위해서 일반 OLS모형과 ARMA모형으로 이루어진 2-stage 계량모형을 적용하였다. <수식 1>은 1단계 계량모형에서는 일반적인 OLS(ordinary least square) 모형을 이용해서 시간별 전력수요에서 달력효과(calender effect)와 기온효과(temperature effect)를 분리추정하였다. 1단계 OLS모형은 크게 3부분으로 이루어져있는데, 첫부분은 계수가 β 로 표현된 부분으로 연간, 반년간, 주간, 반주간, 일간, 반일간 주기에서의 사인 곡선과 코사인 곡선을 설명변수로 포함시켜서 전력수요에 숨어있는 전반적인 달력효과를 설명하였다. 두 번째 부분은 계수가 γ 로 표현된 부분으로 여름철과 겨울철 가변수, 주말과 휴일을 나타내는 가변수를 포함시켜서 달력효과에 추가적으로 계절효과와 휴일 및 주말 효과를 설명하였다. 세 번째는 계수가 δ 로 표현된 부분으로 CDD, HDD, CDD², HDD²를 이용해서 각 기온변수와 전력수요 간의 선형·비선형 관계를 최대한 설명하려 하였다. 종속변수인 시간별 전력수요는 크기효과를 통제해 주기 위해 로그변환을 하였다. 아래첨자 i 는 육지와 제주를 나타내는 인덱스이고, 아래첨자 t 는 시간을 나타내는 인덱스이다.

〈수식 1〉 stage 1 - OLS 분석

$$\begin{aligned} \ln demand_{i,t} &= \alpha_1 + \beta_1 * Trend + \beta_2 * YC_t + \beta_3 * YS_t + \beta_4 * YCH_t + \beta_5 * YSH_t \\ &+ \beta_6 * WC_t + \beta_7 * WS_t + \beta_8 * WCH_t + \beta_9 * WSH_t \\ &+ \beta_{10} * DC_t + \beta_{11} * DS_t + \beta_{12} * DCH_t + \beta_{13} * DSH_t \\ &+ \gamma_1 * Su_t + \gamma_2 * Wi_t + \gamma_3 * Wd_t + \gamma_4 * Df_t \\ &+ \delta_1 * CDD_{i,t} + \delta_2 * HDD_{i,t} + \delta_3 * CDD_{i,t}^2 + \delta_4 * HDD_{i,t}^2 + res_{i,t} \end{aligned}$$

Where, YC=Yearly cosine, YS=Yearly sine,

YCH=Yearly cosine half, YSH=Yearly sine half,

WC=Weekly cosine, WS=Weekly sine,

WCH=Weekly cosine half, WSH=Weekly sine half,
 DC=Daily cosine, DS=Daily sine,
 DCH=Daily cosine half, DSH=Daily sine half,
 Su=summer, Wi=winter, Wd=Weekend, Df=Dayoff,
 res=residual

전력수요는 기본적으로 시계열자료이기 때문에 1단계 OLS모형의 오차항인 $res_{i,t}$ 에는 많은 시계열적인 정보들이 포함되어 있다. 따라서 2단계에서는 $res_{i,t}$ 를 종속변수로 하여 ARMA모형을 1단계의 오차항에 포함되어있는 추가적인 시계열 정보를 추정하였다. 전력수요는 기본적으로 우상향하는 추세가 있기 때문에 ADF(Augmented Dickey-Fuller) 테스트 등을 이용한 정상성 검정(stationary test)을 해야하지만 1단계 OLS 모형의 오차항인 $res_{i,t}$ 는 trend 변수에 의해서 추세가 통제된 오차항이기 때문에 정상성을 자동으로 만족시켜 추가적인 검정없이 시계열 분석이 가능하다.

〈수식 2〉 Stage 2 - ARMA 모형

$$res_{i,t} : (1 - \sum_{j=1}^p \alpha_j L^j) res_{t,i} = (1 + \sum_{k=1}^q \theta_k L^k) \epsilon_{t,i}$$

$res_{t,i}$: 1단계 OLS 모형의 오차항

$\epsilon_{t,i}$: 2단계 ARMA모형의 백색잡음잔차(white noise residual)

L : ARMA모형의 lag operator

AR항은 선행연구인 Mo(2012)의 방법론을 적용하여 1기전, 24기전, 25기전의 Lag 변수를 포함시켰고, MA항은 AIC와 SIC 지표가 가장 낮은 모형을 선정했다. 그 결과 육지는 AR(1,24,25) MA(9) 모형이 제주도는 AR(1,24,25)-MA(8) 모형이 선정되었다.

Ⅲ. 냉난방수요 추정 결과분석

1. 계량모형 추정결과

<표 2>는 육지의 1단계 OLS모형과 2단계 ARMA모형의 추정결과 값을 보여주고 있다. 1단계 OLS모형의 설명력은 86%이고, 달력효과 변수, 계절 및 휴일효과 변수, 기온효과 변수들이 모두 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다. 2단계 ARMA모형에서도 AR(1,24,25)와 MA(9)에 해당하는 대부분의 설명변수들이 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났고, 1단계와 2단계 모형을 포함하는 Psuedo R^2 는 90%³⁾로 전력수요 변동에 대한 본 모형의 설명력이 준수한 것으로 나타났다.

<표 3>은 제주의 1단계와 2단계 모형 추정결과를 보여주고 있다. 제주모형의 경우 1단계 OLS모형의 설명력은 90% 수준이고 1단계와 2단계 모형을 포함하는 Psuedo R^2 는 90%로 육지와 비슷한 수준으로 나타났다. 각 단계별 설명변수의 유의성도 육지결과와 유사하게 거의 모든 변수가 1% 유의수준에서 유의한 것으로 나타났다.

두 분석결과에서 눈에 띄는 차이는 여름철과 겨울철 가변수가 육지는 각각 음수, 양수이고 제주는 양수, 양수라는 것이다. 여름철과 겨울철이 타 계절대비 평균기온이 높게 분석된 제주의 추정치는 합리적인 것으로 보이는데 육지에서 여름철의 값이 음수인 것은 그 값이 겨울철 가변수대비 1/5수준으로 작지만 직관과 많지 않는 부분이 있다. 이는 두 가지 원인에서 기인하는 것으로 판단된다. 첫 번째는 우리나라 전력수요는 1년 평균적으로 여름철 평균수요상

3) $Pseudo R^2 = 1 - \frac{var(2단계 모형의 white noise residual)}{var(종속변수(indemand))}$

승이 겨울철 평균수요상승보다 현저히 낮아 6,7,8,9월로 제한 여름철이 평균적으로는 1년 전력수요 상승보다 소폭 낮을 수 있다. 여름철은 특정일 고온으로 인해 낮시간 전력수요가 급등해서 문제를 유발하지만 우리나라 전력수요는 평균적으로 겨울철 수요가 훨씬 높다. 이러한 특성 때문에 나타난 계수값으로 생각된다. 제주는 겨울철 수요가 육지만큼 높지않기 때문에 두 계절이 고르게 양수값을 가지는 것으로 나타났다. 두 번째는 육지의 경우 지역별 수요와 기온이 일대일로 매칭이 되는 것이 아니라 가중평균치를 이용했기 때문에 이 과정에서 여름철 기온이 상대적으로 과소계상 되었을 가능성이 있다.

〈표 2〉 1단계 및 2단계 모형 추정 결과값 - 육지

1단계 OLS모형 변수	1단계 추정결과	2단계 ARMA모형 변수	2단계 추정결과
C	10.94467*** (0.001418)	AR(1)	0.748380*** (0.015958)
TREND	2.78E-06*** (4.60E-08)	AR(24)	0.617020*** (0.003076)
YC	8.47E-05 (0.002013)	AR(25)	-0.533131*** (0.009710)
YS	-0.007549*** (0.001024)	MA(1)	0.509027*** (0.015550)
YCH	0.026659*** (0.000694)	MA(2)	0.357985*** (0.021517)
YSH	0.028089*** (0.000849)	MA(3)	0.229326*** (0.022513)
WC	-0.062009*** (0.000469)	MA(4)	0.038682* (0.020857)
WS	0.045416*** (0.000471)	MA(5)	0.096328*** (0.017074)
WCH	-0.017794*** (0.000470)	MA(6)	0.096111*** (0.014682)
WSH	0.046322*** (0.000487)	MA(7)	0.038942 (0.012797)
DC	-0.068391*** (0.000522)	MA(8)	-0.002545* (0.010679)
DS	-0.069424*** (0.000539)	MA(9)	-0.016531*** (0.009156)

1단계 OLS모형 변수	1단계 추정결과	2단계 ARMA모형 변수	2단계 추정결과
DCH	-0.000824* (0.000472)		
DSH	-0.043409*** (0.000474)		
SUMMER	-0.001371** (0.001892)		
WINTER	0.005514*** (0.001860)		
WEEKEND	-0.025026*** (0.000916)		
DAYOFF	-0.151249*** (0.001542)		
CDD	0.026396*** (0.000636)		
HDD	0.005539*** (0.000236)		
CDDSQ	-0.000552*** (7.23E-05)		
HDDSQ	5.76E-05*** (7.40E-06)		

주1) *, **, ***는 10%, 5% 및 1% 수준에서의 통계적 유의도

주2) ()는 std.Error

〈표 3〉 1단계 및 2단계 모형 추정 결과값 - 제주

1단계 OLS모형 변수	1단계 추정결과	2단계 ARMA모형 변수	2단계 추정결과
C	6.234948*** (0.001245)	AR(1)	0.654424*** (0.018587)
TREND	5.51E-06*** (4.44E-08)	AR(24)	0.515063*** (0.003587)
YC	0.018620*** (0.001725)	AR(25)	-0.330015*** (0.010786)
YS	0.024315*** (0.001023)	MA(1)	0.422654*** (0.018948)
YCH	0.014396*** (0.000660)	MA(2)	0.266708*** (0.020627)
YSH	0.026340*** (0.000951)	MA(3)	0.208634*** (0.018301)

냉난방전력 수요자원의 경제적 가치 분석

1단계 OLS모형 변수	1단계 추정결과	2단계 ARMA모형 변수	2단계 추정결과
WC	-0.023742*** (0.000455)	MA(4)	0.162502*** (0.015870)
WS	0.013712*** (0.000457)	MA(5)	0.147478*** (0.013575)
WCH	-0.004664*** (0.000456)	MA(6)	0.127036*** (0.011628)
WSH	0.019054*** (0.000472)	MA(7)	0.097479*** (0.009833)
DC	-0.039125*** (0.000478)	MA(8)	0.021149*** (0.007769)
DS	-0.089097*** (0.000468)		
DCH	-0.007420*** (0.000456)		
DSH	-0.064981*** (0.000455)		
SUMMER	0.016454*** (0.001883)		
WINTER	0.004685** (0.001825)		
WEEKEND	-0.016667*** (0.000889)		
DAYOFF	-0.063195*** (0.001498)		
CDD	0.047676*** (0.000801)		
HDD	0.014950*** (0.000317)		
CDDSQ	0.000297*** (0.000113)		
HDDSQ	0.000122*** (1.70E-05)		

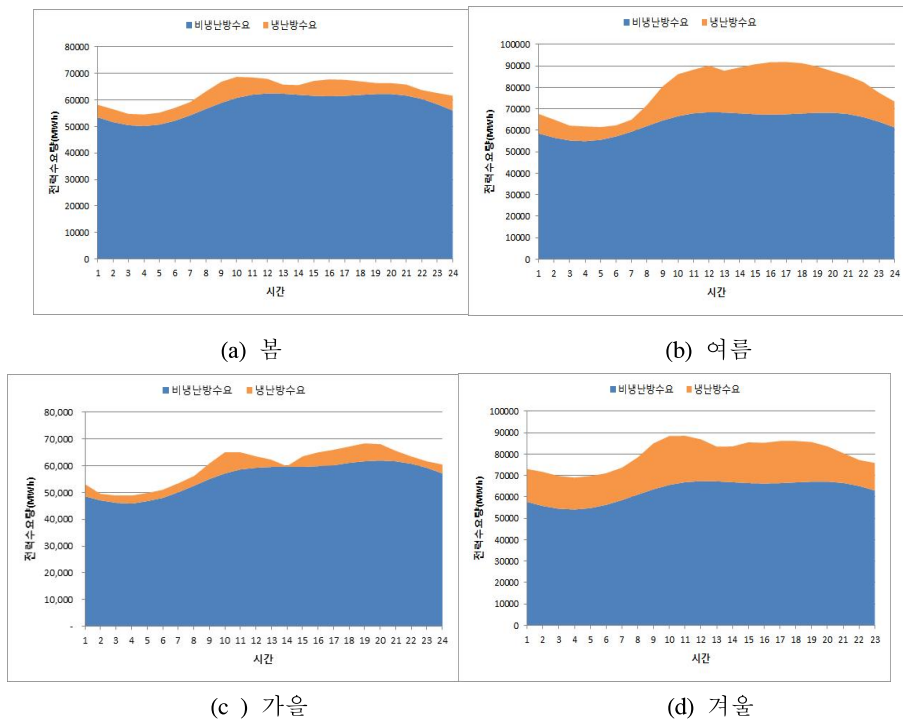
주1) *,**,***는 10%,5% 및 1% 수준에서의 통계적 유의도

주2) ()는 std.Error

2. 계절별 냉난방수요 분석결과

[그림 3]은 육지에서 각 계절별 대표일의 24시간 전력수요에서 냉난방수요를 분리 추정한 결과를 보여주고 있다. 냉난방수요의 추정치는 위 모형식에서 CDD와 HDD에 관련한 변수에 의해서 설명되는 수요를 의미한다. 여름철 대표일과 겨울철 대표일은 냉난방수요가 가장 많이 발생하는 날인 여름철 피크일과 겨울철 피크일을 대표일로 선택했고, 봄철과 가을철 대표일은 각각 봄철과 가을철 평균 냉난방수요 비율과 일치하는 주중날짜로 선택했다. 선택된 계절별 대표일은 봄은 4월24일, 여름은 7월24일, 가을은 10월15일, 겨울은 2월6일이다.

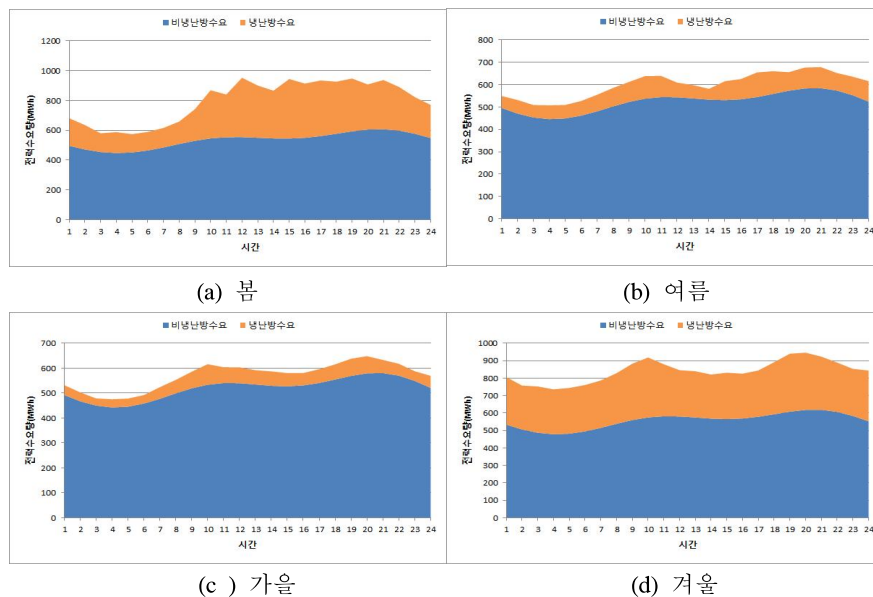
[그림 3] 24시간 냉난방수요와 비냉난방수요 추정치-육지, 계절별대표일



여름철 피크일의 냉난방수요는 예상했던 대로 더운 낮 시간에 집중적으로 발생하다가 새벽시간에는 상당히 감소하는 형태를 보이고 있다. 반면 겨울철 피크일의 냉난방수요는 낮 시간과 밤 시간에 비교적 고르게 발생되고 있는 것을 알 수 있다. 이는 겨울철에 낮에 기온은 상대적으로 높지만 사람들의 활동과 에너지사용이 집중되면서 크기효과로 인해 난방수요의 총량은 높아지게 되고, 밤 시간은 사람들의 활동은 감소하지만 기온이 낮아져 비슷한 규모의 난방수요가 발생하는 것으로 해석이 가능하다. 반면 봄과 가을철 평균적인 날의 냉난방수요는 전반적으로 고르게 낮지만, 낮 시간에 소폭 상승하는 패턴을 보여주는 것을 알 수 있다.

[그림 4]는 제주도 계절별 대표일의 냉난방수요 추정치를 보여준다. 여름철 피크일과 겨울철 피크일의 냉난방수요의 패턴은 육지와 유사한 형태를 보이고 있음을 알 수 있다. 반면 육지의 패턴과 눈에 띄는 차이점은 제주에서 전체수요에서 냉난방수요의 비중이 훨씬 더 높다는 것이다. 선택된 계절별 대표일은 봄은 4월24일, 여름은 8월6일, 가을은 10월23일, 겨울은 1월26일이다.

[그림 4] 24시간 냉난방수요와 비냉난방수요 추정치-제주, 계절별대표



이는 제주도에서 전체수요 대비 냉난방수요가 특별하게 높다고 해석하는 것보다는 추정데이터의 차이에서 발생하는 차이점으로 해석할 수 있다. 제주도는 제주도의 시간별 전력수요와 제주도의 기온을 가지고 냉난방수요를 추정하였기 때문에 기온이 전력수요에 미치는 영향을 정밀하게 분석할 수 있었던 반면에, 육지는 전국의 전력수요에서 전국 주요 시·도 기온데이터의 평균치를 이용해 냉난방수요를 추정하였다. 이는 시간별 전력수요자료가 육지의 경우 시·도별로 정리되지 않고 통합되어 보고되기 때문인데 이러한 자료의 한계 때문에 육지의 경우 기온이 전력수요에 미치는 효과가 상당부분 희석되어서 반영이 되는 것이다. 따라서 육지의 냉난방전력수요는 실제양보다 과소추정 되었을 가능성이 높고, 전체 전력수요에서 냉난방전력수요의 정교한 비율은 제주의 추정치를 바탕으로 판단하는 것이 정확한 이해에 더 도움이 될 것으로 생각한다.

<표 4>는 육지와 제주에서 각 계절별 냉난방전력수요의 비율을 요약해서 보여주고 있다. 일반적으로 난방에 화석연료를 사용하는 다른 국가와 달리 우리나라는 전력을 사용하는 비중이 높아 전체비중으로 보면 여름철 냉난방수요 비율보다 겨울철 냉난방수요 비율이 더 높은 것으로 나타났다. 봄과 가을은 육지의 경우 전체 전력수요에서 7~9% 수준만이 냉난방전력수요인 것으로 추정되었다.

〈표 4〉 계절별 냉난방수요 비율, 육지 vs 제주

계절	육지 냉난방수요 비율(%)	제주 냉난방수요 비율(%)
봄 (3,4,5 월)	8.3	14.2
여름 (6,7,8 월)	12.3	21.8
가을 (9,10,11 월)	7.1	12.3
겨울 (12,1,2 월)	16.0	24.8

앞서 언급하였듯이 제주의 냉난방수요의 비율이 육지의 냉난방수요비율보다 5%~10% 가량 더 높은 것으로 추정되었다. 전력수요와 기온의 관계를 더 직접적으로 추정했던 제주의 추정결과가 더 실제에 가까운 냉난방수요 비율로 이해할 수 있을 것이다. 제주의 경우에는 여름철의 경우 약 21.8%, 겨울철의 경우 약 24.3%이 각각 냉방수요, 난방수요인 것으로 추정되었다.

<표 5>는 여름철과 겨울철 전력수요 피크일에 냉난방수요의 전체비율과 피크일의 피크시간에 냉난방수요의 비율을 보여주고 있다. 냉난방수요가 경감되었을 때 직접적으로 효용이 발생하는 날은 냉난방수요의 증가로 공급예비율이 위협을 받는 여름철과 겨울철 피크일이다. 따라서 각 계절별 평균적인 냉난방수요 비중을 살펴보는 것도 중요하지만 안정적인 전력공급에 핵심적인 문제를 유발시키는 피크일에 냉난방수요의 비중이 얼마나 되는지 살펴보는 것은 더욱 중요하다.

<표 5> 전력피크일 냉난방수요 비율, 육지 vs 제주

	피크일 냉난방수요 비율(%)	피크시간 냉난방수요 비율(%)	피크시간 전력수요 (MWh)	피크일 전력수요 (MWh)
육지 여름철 피크일	19.6	26.5	92,478	1,903,235
육지 겨울철 피크일	21.4	25.8	88,238	1,914,480
제주 여름철 피크일	32.8	37.7	949	19,154
제주 겨울철 피크일	33.6	35.3	950	20,206

육지의 여름철과 겨울철 피크일의 전체 냉난방수요 비율은 각각 19.6%와 21.4%로 나타났다. 반면 이 피크일의 피크시간에 냉난방수요의 비율은 여름철과 겨울철이 거의 유사하게 25~26% 수준으로 나타났다.

제주의 여름철과 겨울철 피크일의 전체 냉난방수요 비율은 각각 32.8%와 33.6%인 것으로 나타났고, 피크시간의 비율은 각각 37.7%와 35.3%인 것으로

나타났다. 앞서 설명하였듯이 제주의 비율이 실제 추정치에 더욱 가까운 냉난방수요 비율임을 감안하면 여름철과 겨울철 문제를 유발하는 피크시간 전력의 약 1/3이 냉난방전력임을 알 수 있다. 이는 달력효과를 기반으로 반복적으로 발생하는 비냉난방수요가 피크시간에는 약 2/3을 차지하는데, 그 절반에 이르는 냉난방수요가 피크시간에 집중적으로 추가적으로 발생되면서 고질적인 공급예비율 문제를 유발시키는 것으로 해석할 수 있다. 반대로 해석하면 피크시간 1/3을 차지하는 냉난방수요를 효과적으로 관리할 경우 전력공급의 안정성과 효율성을 대폭 개선시킬 수 있음을 의미한다.

Ⅳ. 냉난방수요자원 최적 활용의 경제적 가치 분석

1. 최적화 모형 구조

앞서 추정한 냉난방전력수요 추정치를 기반으로 이 냉난방전력수요가 전력시스템 운영자에 의해서 수요반응(Demand Response, DR)자원으로 최적으로 활용될 경우 전력공급비용 경감에 얼마나 기여할 수 있는지 분석하였다. <수식 3>은 에너지비용을 최소화하는 최적화구조를 보여주고 있다.

<수식 3>-(1)의 목적함수인 발전비용최소화는 24시간동안 해당시간의 한계 전력공급비용(p_t)과 순수요량(q_t^{ND})의 곱을 최소화하는 것으로 정의된다. 이때 결정변수는 q_t^{ND} 으로 이는 기본수요와 냉난방수요로 구성되어있는데 본 모형에서는 냉난방수요가 자원화되어 최적 q_t^{ND} 를 결정하게 된다. <수식 3>-(2)에서 기본수요(q_t^{org})는 앞서 추정한 냉난방수요(q_t^{TSD} , temperature sensitive demand, TSD)와 비냉난방수요(q_t^{NTSD} , non-temperature sensitive demand, NTSD)의 합으로 정의된다. <수식 3>-(3)에서 냉난방수요자원이 활용됐을

때를 뜻하는 순수요(q_t^{ND} , net demand)는 기존의 기본수요에서 냉난방수요반응으로 인해 t 기에 발생하는 수요상승량($q_t^{TDR,up}$, temperature demand response up)과 t 기에 발생하는 수요감축량($q_t^{TDR,down}$, temperature demand response down)의 합으로 표현된다. 즉 t 기의 수요감축량이 다른 기의 수요상승량으로 이전되는 것을 뜻하는데 수요가 이전될 때 비효율이 존재할 수 있는 경우를 가정해서 수요반응(DR) 효율(Eff^{TDR})을 모형에 포함시켰다. 예를 들어 DR 효율이 90%라고 한다면 오후 2시에 100MWh의 수요를 감축하기 위해서는 오전 3시에 110MWh의 수요가 발생된다는 뜻이다. 이것은 수요반응이 단순히 수요시간의 이전으로도 나타나지만 앞서 설명하였듯이 미국 같은 경우 충분한 인센티브가 주어질 경우 냉난방저장장치(thermal storage)를 이용해서 새벽 전기요금이싼 시간에 냉방/난방에너지를 저장해서 피크시간에 냉난방용으로 활용하는 경우가 많다. (Jeon et al.(2015), MacCracken(2010), ThermalCube(2011)) 이렇게 냉난방저장장치를 활용해 적극적인 냉난방수요이전이 발생할 경우 저장과정에서 충방전 비효율이 발생할 수 있기 때문에 이를 모형화하였다.

<수식 3>-(4)는 t 기의 수요감축량($q_t^{TDR,down}$)이 앞서 추정된 시간별 냉난방수요량(q_t^{TSD})을 넘어설 수 없다는 제약이다. 이때 냉난방수요자원 중 수요반응에 참여하는 참여율(α)을 정의할 수 있는데 이 참여율은 0에서 1사이 값을 가진다. 즉 참여율이 1일 경우 추정된 전체 냉난방수요가 자원화됨을 뜻하고, 참여율이 0일 경우는 냉난방수요가 전혀 자원화 되지 않아 제어가능하지 않음을 뜻한다. <수식 3>-(5)에서 수요상승량($q_t^{TDR,up}$)은 특별한 상한이 존재하지 않고 어느 시간으로든 경제적으로 타당하다면 옮길 수 있는 것으로 정의된다. <수식 3>-(6)은 24시간 총 수요감축량과 총 수요상승량의 합은 항상 같아야 함을 뜻한다. 이때 총 수요상승량은 DR 효율이 적용되기 전인 순 수요상승량을 뜻한다. DR 효율이 1보다 낮은 값이라면 수요상승량이 수요감축량보다 더 높게 된다.

<수식 3>-(7)은 각 시간의 $SMP(p_t)$ 는 순수요(q_t^{ND})의 선형함수 형태로 정의됨을 보여준다. 이 선형함수는 전력공급곡선을 뜻하는데, 공급곡선의 형태는 실제 시장에서 관찰된 SMP와 기본수요(q_t^{org})를 기반으로 추정하였다.

〈수식 3〉 냉난방수요자원 최적화 모형

$\text{minimize}_{q_t^{ND}} TC = \sum_{t=1}^{24} p_t \cdot q_t^{ND} \quad (1)$	
subject to	
$q_t^{org} = q_t^{NTSD} + q_t^{TSD} \quad (2)$	
$q_t^{ND} = q_t^{NTSD} + q_t^{TSD} + \frac{1}{Eff^{TDR}} q_t^{TDR,up} - q_t^{TDR,down}$ $= q_t^{org} + \frac{1}{Eff^{TDR}} q_t^{TDR,up} - q_t^{TDR,down} \quad (3)$	
$0 \leq q_t^{TDR,down} \leq \alpha \cdot q_t^{TSD} \quad (4)$	
$0 \leq q_t^{TDR,up} \quad (5)$	
$\sum q_t^{TDR,up} = \sum q_t^{TDR,down} \quad (6)$	
$p_t = f(q_t^{ND}) \quad (7)$	

<표 6>은 <수식 3>의 최적화모형에서 적용된 변수들의 정의에 대해서 설명하고 있다.

〈표 6〉 최적화 모형 변수 정의

변수	정의
q_t^{org}	t기의 기본전력수요
q_t^{ND}	t기의 순수요
q_t^{NTSD}	t기의 비냉난방전력수요
q_t^{TSD}	t기의 냉난방전력수요
$q_t^{TDR,up}$	t기의 냉난방수요반응 전력구매량
$q_t^{TDR,down}$	t기의 냉난방수요반응 전력감축량
Eff^{TDR}	냉난방수요자원의 수요반응(DR) 효율
α	냉난방수요의 수요반응 참여율
p_t	t기의 전력한계생산비용

2. 냉난방수요 최적 활용의 경제적 가치 분석

<표 7>과 같이 최적화 분석은 크게 3가지 시나리오로 나누어서 수행하였다. 첫째 시나리오는 냉난방수요자원 참여율이 100%이고 냉난방수요반응 효율(DR 효율)이 100%인 경우를 기준 시나리오로 설정했다. 둘째 시나리오는 DR 효율은 100%이면서 참여율이 60%와 30%인 경우로 설정해서 참여율의 변화에 따른 냉난방수요자원 가치변화를 살펴보았다. 셋째 시나리오에서는 참여율은 100%이면서 DR 효율이 95%, 90%인 경우로 설정하여 DR 효율이 하락할 경우 냉난방수요자원의 가치변화를 분석하였다.

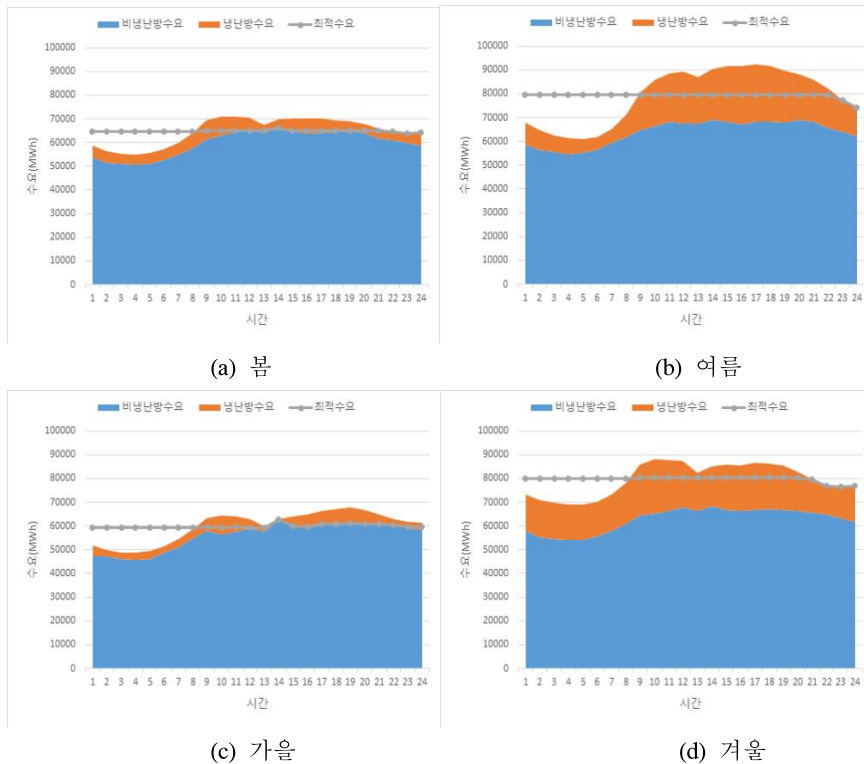
〈표 7〉 최적화 시나리오 구조

시나리오 구성	개별 케이스	
시나리오 1 - 기준시나리오	참여율 100%, 효율 100%	
시나리오 2 - 참여율 영향분석	참여율 60%, 효율 100%	참여율 30% 효율 100%
시나리오 3 - DR효율 영향분석	참여율 100%, 효율 95%	참여율 100%, 효율 90%

[그림 5]는 기준 시나리오인 시나리오 1에서 100% 참여율, 100% 효율인 경우의 24시간 최적수요패턴을 보여주고 있다. 냉난방수요자원이 풍부한 여름철과 겨울철은 값비싼 피크수요를 전력한계생산비용이 상대적으로 저렴한 새벽시간으로 충분히 옮길 수 있을 정도로 냉난방수요가 많아 냉난방수요의 규모가 제약조건으로 작동하고 있지 않음을 알 수 있다. 봄철 대표일 역시 냉난방수요 규모는 작지만 우리나라 봄·가을 전력수요패턴 특성상 낮과 밤시간의 전력수요차이가 크지 않아서 소량의 냉난방수요자원으로도 최적화를 통해 충분히 전력수요를 거의 평탄화 시킬 수 있는 것으로 나타났다.

가을철 대표일은 냉난방수요자원의 양이 최적전력수요를 평탄화 시키는데 있어서 제약조건으로 작동하고 있는 것을 알 수 있다. 해당일은 14시경에 냉난방수요가 거의 없어서 경감시킬 수요자원이 없는 것을 알 수 있다.

[그림 5] 시나리오1: 100%참여율, 100%효율 최적수요패턴-계절별 대표일

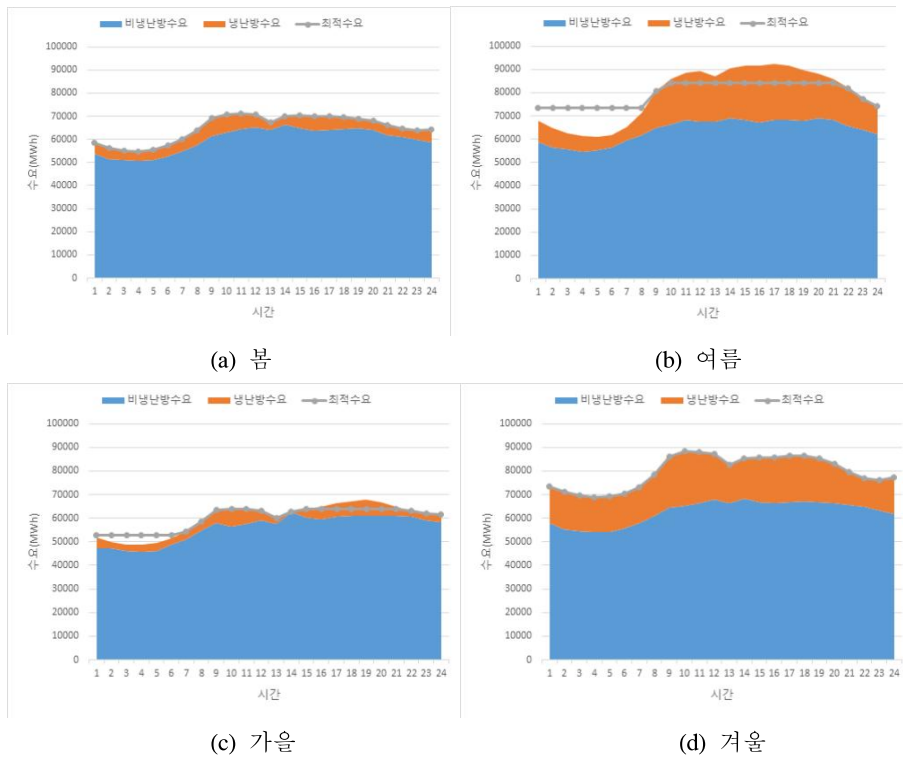


전력수요를 평탄화 시킬 경우 크게 전력공급비용관점에서 두가지 비용경감 효과가 발생한다. 첫째는 변동비가 비싼 피크수요를 낮춰줌으로써 변동비가 상대적으로 저렴한 발전기들을 활용해 전력공급을 할 수 있게 되어 발전비용이 경감되게 된다. 두 번째는 피크수요를 낮춰줌으로써 안정적인 전력공급을 위해 유지해야 하는 발전용량을 낮춰서 장기적으로 발전설비투자를 회피시켜 주는 편익이 발생되게 된다. 이 비용경감효과를 직관적으로 표현하면 용량비

용경감효과라고 할 수 있다.

[그림 6]은 시나리오 2에서 냉난방수요자원의 참여율은 100%이지만 DR 효율이 90%로 낮아지는 경우의 계절별 최적수요 패턴을 보여주고 있다. DR 효율이 90%로 낮아질 경우 봄과 겨울철 대표일의 경우에는 냉난방수요자원이 전혀 활용되지 못함을 알 수 있다.

[그림 6] 시나리오2: 100%참여율, 90%효율 최적수요패턴-계절별 대표일



앞서 언급했듯이 우리나라 전력수요 패턴의 특징은 미국 등 기타 국가와 달리 밤과 낮사이의 전력수요격차가 크지 않다는 것인데, 피크시간과 비피크시간의 전력수요격차가 크지 않으면 한계가격격차도 충분히 크지 않아 피크시간의 전력수요를 비피크시간으로 옮기는 것에 대한 인센티브가 상대적으로

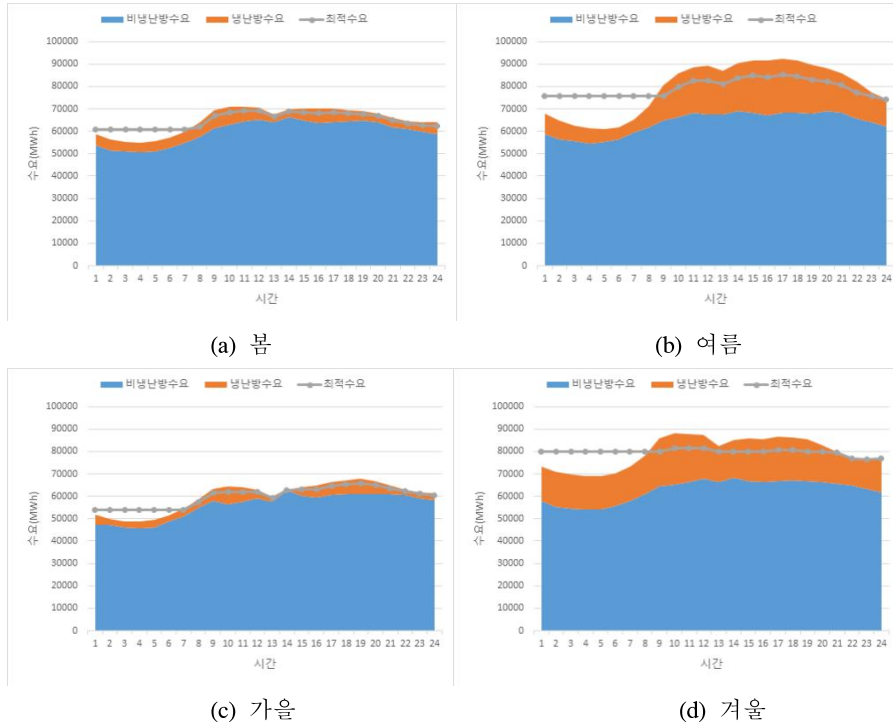
하락하게 된다. 여기에 DR 효율이 90%로 조정될 경우 예를 들어 100MWh의 수요를 피크시간에 줄이기 위해서는 110MWh의 수요를 비피크시간에 늘여야 하는데 이 10MWh의 추가구매를 하는 비용이 수요이전(load shifting)으로 인한 편익보다 크지 않으면 수요이전이 발생하지 않는 것이다. 현재 사용되는 일반적인 에너지저장장치의 효율이 90% 안팎인 것을 감안하면 우리나라 전력수요패턴 환경에서는 이 DR 효율이 수요자원의 경제적 가치를 결정하는데 중요한 요소임을 알 수 있다.

여름철 대표일은 피크시간과 비피크시간의 한계발전가격차이가 상대적으로 커서 수요이전이 일정부분 발생하는 것을 알 수 있다. 하지만 이 양은 앞선 [그림 5]-(b)와 비교하면 상대적으로 미미한 양임을 알 수 있다.

[그림 7]은 시나리오 3에서 DR 효율은 100%이면서 냉난방수요자원 참여율이 30%인 경우의 계절별 최적수요패턴을 보여주고 있다. 참여율이 30%로 제한될 경우 모든 계절별 대표일에서 냉난방수요자원 활용이 제한되고 있는 것을 알 수 있다. 특히 시나리오 1에서는 충분한 냉난방수요자원으로 인해 거의 평탄한 최적수요를 보여줬던 여름철과 겨울철 대표일에서도 참여율이 30%로 제한될 경우 제한적인 냉난방수요자원 양으로 인해 충분히 피크수요를 경감하지 못함을 알 수 있다.

이는 냉난방수요자원을 통해 전력공급의 효율성을 극대화하기 위해서는 충분한 유인 제공을 통한 참여율 확대가 필요함을 뜻한다. 전력수요, 특히 가정용전력수요는 동적요금제를 기반으로 수요이전을 할 때 월 전기요금 인하폭이 적고 전력수요 조절의 불편함때문에 참여유인이 낮은 것이 사실이다. 이를 극복하기 위해서는 앞서 언급했듯이 지능형 온도조절기(smart thermostat)나 지능형 에어컨의 보급을 통해서 가구별 전기요금 인하폭은 크지 않지만 수요조절의 불편함을 대폭 개선해서 참여율을 높이는 방안이 강구되어야 한다.

[그림 7] 시나리오3: 30%참여율, 100%효율 최적수요패턴-계절별 대표일



<표 8>는 기준수요와 시나리오 1, 2, 3의 계절별 대표일 최적화 결과를 선형보간법을 통해 연간비용으로 환산할 경우 냉난방수요자원이 각 시나리오별로 얼마나 큰 전력공급비용경감효과를 유발하는지 요약해서 보여주고 있다.

2018년 실적치를 이용한 기준수요에서 연간 발전비용은 약 30조원, 용량비용을 약 5.5조원이고 이 두비용을 합한 총 전력공급비용은 약 35.5조원인 것으로 나타났다. 연간 발전비용은 전력공급곡선을 기반으로 순수 발전비용을 추정한 것으로 전력거래소에서 발표한 2018년 전력량정산금인 약 41.4조원보다는 낮은 값을 가진다. (전력거래소(2019)) 이는 전력거래소의 전력량정산금은 SMP를 기준으로 발전원별로 가중치를 적용해 발전비용과 기타 운영비용에 일정한 운영수익을 보장해주는 정산금이기 때문에 순수 변동비 개념인 발전비용은 이보다 낮은 값을 가진다.

〈표 8〉 냉난방수요자원 최적화 시나리오별 비용경감효과

(십억원/년)	기준 수요	시나리오 1	시나리오 2		시나리오 3	
		최적수요 비용경감 (100% 참여율, 100% DR효율)	60% 참여율 비용경감	30% 참여율 비용경감	95% DR효율 비용경감	90% DR효율 비용경감
발전비용	30,019	153	148	128	80	39
용량비용	5,483	728	726	433	500	251
총공급비용	35,502	881	874	561	581	291
발전비용 경감비율		0.5%	0.5%	0.4%	0.3%	0.1%
용량비용 경감비율		13.3%	13.2%	7.9%	9.1%	4.6%
총공급비용 경감비율		2.5%	2.5%	1.6%	1.6%	0.8%
피크수요 (MWh)	92,478	80,199	80,233	85,171	84,037	88,237

용량비용은 피크발전기인 복합화력발전의 연간화한 건설비용인 59.29 백만원/MW-yr을 적용하여 추산하였다.⁴⁾(조성진, 박찬국 (2015)) 우리나라 주요 발전원 구성은 원자력, 석탄, LNG이고 이 중 LNG발전의 MW당 건설비용이 가장 낮아 이렇게 추산할 경우 용량비용은 과소추정될 수 있다. 하지만 여기서 제시한 기준수요의 용량비용은 최적화 결과의 피크수요경감으로 인한 용량비용경감효과를 추정하기 위한 기준 값으로 활용되는 성격을 가지고 있다. 피크수요경감으로 인한 발전소건설투자비 회피 편익은 거의 LNG발전에 한해 발생되기 때문에 각 시나리오별 용량비용경감효과를 추정하기 위해 LNG발전 건설비용을 적용한 것은 적절한 추정 방법이라 할 수 있다.

시나리오 1의 비용경감효과는 발전비용에서 약 1530억원/년, 용량비용에서 약 7,280억원/년 발생하여 총 8,810억원의 연간비용경감효과가 발생하는 것을

4) LNG복합화력 MW당 건설비용 900백만원/MW, 수명 30년, 할인율 5.6% 적용

알 수 있다. 총공급비용의 구성은 발전비용이 약 85%이고 용량비용은 약 15% 수준이지만 비용경감효과의 약 83%는 용량비용경감에서 발생하는 것을 알 수 있다. 이는 피크수요를 비피크시간으로 이전시켜 발생하는 발전비용경감편익보다 피크수요경감을 통한 LNG 복합화력발전기 건설투자회피로 인한 용량비용경감편익이 훨씬 크기 때문이다.

시나리오 2에서 참여율이 감소할 때 냉난방수요자원의 비용경감효과가 어떻게 달라지는지 살펴보면, 60%수준 일때는 총 비용경감이 기준수요대비 약 2.5% 수준으로 100% 참여율과 거의 차이가 없다. 하지만 참여율이 30%로 감소하면 비용경감효과는 1.6% 수준으로 대폭 감소하게되고 이 경감효과감소의 주요원인은 용량비용경감효과가 기존 13.2%에서 7.9%로 절반가까이 감소한 것이 원인임을 알 수 있다. 냉난방수요자원 참여율이 30%수준으로 대폭 하락하게되면 피크수요절감에 제약이 발생하게되고 이는 용량비용경감의 제약으로 바로 연결이 되어 비용경감효과가 하락하는 것이다.

시나리오 3에서는 95%의 DR효율에서는 총공급비용 경감비율이 약 1.6%, 90% DR효율에서는 약 0.8%로 대폭 하락하는 것으로 나타났다. 이는 앞서 언급하였듯이 우리나라의 평평한 수요패턴 구조상 DR효율경감은 냉난방수요자원의 경제성에 직접적인 영향을 미치게 되어 효율이 90%수준으로 하락하게 되면 수요자원의 활용률이 급격히 떨어지게 되는 것이다. 90% DR효율에서는 발전비용경감비율이 0.1%, 용량비용경감비율이 4.6%로 시나리오 I과 비교하면 두 비용요소에서 모두 대폭적인 비용경감효과 하락이 발생한 것을 알 수 있다.

V. 결론 및 토론

본 연구에서는 여름철과 겨울철에 안정적이고 효율적인 전력공급에 문제를 야기하는 냉난방전력수요를 시간별로 추정하고, 이를 바탕으로 냉난방전력수

요자원이 전력시스템운영자에 의해서 최적으로 활용될 경우 전력공급비용 경감에 어떤 영향을 미치는지 분석하였다.

추정결과 냉난방수요로 인해 가장 첨예한 문제가 발생하는 피크일의 경우 약 19.6~33.6%가 전체수요 중 냉난방전력수요이며 공급예비율에 가장 큰 문제를 야기하는 피크시간의 경우 약 25.8%~37.7%가 냉난방전력수요인 것으로 분석되었다. 즉 피크시간의 경우 전체전력수요의 약 1/3이 냉난방수요로, 비냉난방수요는 달력효과에 의해 일상적으로 발생되고 예측 가능한 것을 고려하면 전력공급의 비효율과 전력시스템 운영상의 주요한 문제를 야기하는 핵심적인 원인은 냉난방수요임을 알 수 있었다.

추정된 냉난방수요자원을 활용해서 발전비용 최적화 분석을 한 결과 냉난방수요자원 참여율과 수요자원 효율에 따라서 총공급비용 대비 약 0.8%~2.5%의 전력공급비용이 경감되는 것으로 분석되었다. 전체공급비용경감 중에서는 용량비용경감효과가 발전비용경감효과보다 훨씬 크게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 냉난방수요자원 참여율의 감소보다는 DR 효율감소가 냉난방수요자원의 가치에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

본 연구결과를 통해 도출할 수 있는 시사점은 다음과 같다.

첫째, 안정적이고 비용효율적인 전력공급환경 구축하기 위해서는 냉난방수요자원을 효과적으로 관리할 수 있는 시스템을 구축해야한다. 전체 전력수요 중 약 1/3에 해당하는 규모로 여름철의 혹서기 혹은 겨울철의 혹한기에 추가적인 냉난방수요가 발생하는 것을 앞서 분석에서 살펴보았다. 이렇게 이상기온으로 인해 비약적으로 높은 냉난방수요는 1년 8760시간 중 1%도 안 되는 100시간 이하로 발생된다. 1년 중 100시간만 발생하는 비약적인 냉난방수요를 충족하기위해 LNG발전소를 건설하고 유지하는 것은 아주 비용 비효율적인 해결책이다. 피크수요에 대한 안정적 전력공급의 해결책은 비용 비효율적인 공급관점이 아닌 수요관점의 대안들이 적극적으로 검토되어야 한다. 냉난방수요를 비피크시간으로 이전시키는 것은 직접적으로 피크수요문제를 비용효율적으로 해결할 수 있는 접근이므로 이를 위한 정책이 조속히 도입되어야 한다.

둘째, 냉난방수요자원을 관리 할 수 있는 방안중 하나는 실시간요금제나 계시별요금제와 같이 동적요금제를 이용해서 전력수요자로 하여금 자발적으로 수요이전을 하게끔 하는 방법이다. 이는 수요관리를 소비자에게 맡긴다는 측면에서 소극적인 수요관리라고 할 수 있지만, 요금제만 잘 디자인해서 제시하면 소비자가 반응하기 때문에 관리가 쉽고 추가적인 행정비용이 발생하지 않는다는 점에서 장점이 있다. 지능형 계량기(Automated Metering System, AMI)의 비용이 낮아지고 빠르게 보급되면서 동적요금제를 도입할 수 있는 기술적인 환경은 거의 마련이 되어가고 있기 때문에 동적요금제를 통한 냉난방수요자원 관리는 빠른 시일 내에 적용할 수 있는 정책이다.

셋째, 냉난방수요자원을 활용하는 또 다른 방안은 중개거래사업자가 개입하여 수요자를 대신해서 최적으로 냉난방수요를 관리해주는 방법이다. 이 방법은 전력시스템 운영자의 급전지시를 받는 중개거래사업자가 직접 수요관리를 한다는 점에서 능동적인 수요관리라고 할 수 있다. 양방향 제어가 가능한 지능형 온도제어기(smart thermostat)를 통해서 가상발전소(virtual power plant) 형식으로 중개거래사업자가 다수의 냉난방수요 고객들을 통합해서 직접 관리한다면 냉난방수요자원을 단순한 수요이전을 통한 편익창출 뿐만 아니라 보조서비스 자원으로도 활용가능하다. 하지만 이 방식은 중개거래사업자에게 수익의 일정부분을 공유해야하기 때문에 이 프로그램의 지속가능성을 담보하기 위해서는 서비스를 통한 편익과 중개거래사업자에게 지불되는 비용이 체계적으로 고려되어야 할 것이다.

넷째, 피크시간과 비피크시간의 전력수요차이가 크지 않는 우리나라 특성상 SMP차이에서 오는 차익거래(price arbitrage)에 기초한 수요이전의 편익은 크지가 않다. 이런 이유로 앞서 분석하였듯이 DR 효율이 소폭이라도 감소할 경우 냉난방수요자원의 수요이전 유인은 급속히 감소하게 된다. 하지만 앞서 최적화 분석에서 살펴보았듯이 수요이전을 통한 가장 큰 편익은 용량비용경감 효과에서 발생한다. 따라서 동적요금제를 설계할 때 SMP에 추가로 용량비용경감효과의 편익을 반영한 임계피크요금제(critical peak pricing, CPP)를 결합

하는 것이 필요하다.

에너지전환정책으로 재생에너지의 비중이 점점 증가하면서 재생에너지의 변동성과 불확실성으로 인한 추가적인 전력공급비용이 발생되고 있다. 이러한 상황에서 수요자원을 활용해서 전력시스템의 효율을 높이는 것은 선택이 아닌 필수가 되어가고 있다. 전력수요 중 피크수요 유발의 직접적인 원인이며 비중이 높은 냉난방전력수요를 효과적으로 관리할 수 있다면 재생에너지 기반 전력시스템 환경에서도 비용효율적이며 안정적인 전력공급이 가능할 것이다.

접수일(2020년 2월 7일), 수정일(2020년 4월 27일), 게재확정일(2020년 9월 25일)

◎ 참 고 문 헌 ◎

- 산업통산자원부(2017). “제8차 전력수급기본계획 (2017~2031)”
- 신동현, 조하현(2014a). “한국 일일 최대전력소비의 기상변수 민감도와 임계기온에 관한 실증연구”. *경제연구* 32.4: 175-212.
- 신동현, 조하현(2014b). “기온의 연속, 누적효과가 일일 최대전력소비에 미치는 영향에 관한 연구”. *응용경제* 16.3: 37-76.
- 양준모(2010). “전력수요관리효과 추정에 관한 연구”. *응용경제* 12.3: 131-154.
- 임현진, 정수관, 원두환 (2013). “지구온난화가 가정부문 에너지 소비량에 미치는 영향 분석: 전력수요를 중심으로”. *에너지경제연구* 12.2: 33-58.
- 전력거래소(2019). 2018년 연간 전력시장운영실적.
- 정연제, 김남일(2015). “수요자원의 전력시장 참여 효과 분석”. *에너지경제연구원, 기본연구보고서*.
- 조성진, 박찬국(2015). “원자력발전의 경제적·사회적 비용을 고려한 적정 전원믹스연구 (3 차년도)”. *에너지경제연구원, 기본연구보고서* 15-24.
- Bartusch, C., Wallin, F., Odlare, M., Vassileva, I., and Wester, L. (2011). “Introducing a demand-based electricity distribution tariff in the residential sector: Demand response and customer perception”. *Energy Policy*, 39(9): 5008-5025.
- Cometto, M., Keppler, J. H., Ha, J., Paillere, H., Bilbao y Leon, S., Iracane, D., ... and Sepulveda, N. A. (2019). “The Costs of Decarbonization: System Costs with High Shares of Nuclear and Renewables (No. NEA-7299)”. *Organisation for Economic Co-Operation and Development*.
- Cramton, P., Ockenfels, A., and Stoft, S. (2013). “Capacity market fundamentals”. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2(2): 27 - 46.
- De Felice, M., Alessandri, A., and Catalano, F. (2015). “Seasonal climate forecasts for medium-term electricity demand forecasting”. *Applied Energy*, 137: 435-444.
- De Sario, M., Katsouyanni, K., and Michelozzi, K. (2013). “Climate change, extreme weather events, air pollution and respiratory health in Europe”. *European Respiratory Journal*, 42: 826-843.
- Dyson, M. E., Borgeson, S. D., Tabone, M. D., and Callaway, D. S. (2014). “Using smart meter data to estimate demand response potential, with application to solar energy integration”. *Energy Policy*, 73: 607-619.

- Jeon, W., Mo, J. Y., and Mount, T. D. (2015a). “Developing a smart grid that customers can afford: The impact of deferrable demand”. *The Energy Journal*, 36(4).
- Jeon, W., Lamadrid, A. J., Mo, J. Y., and Mount, T. D. (2015b). “Using deferrable demand in a smart grid to reduce the cost of electricity for customers”. *Journal of Regulatory Economics*, 47(3): 239-272.
- Knaut, A., & Paulus, S. (2016). “Hourly price elasticity pattern of electricity demand in the German day-ahead market (No. 16/07)”. *EWI Working Paper*.
- MacCracken, M. (2010). “Energy storage: providing for a low-carbon future”. *ASHRAE Journal*, 52(9): 28-34.
- Mo, J. Y. (2012). “Economic Analyses of Plug-in Hybrid Electric Vehicles, Carbon Markets, and Temperature-Sensitive Loads”.
- Moral-Carcedo, J., and Vicéns-Otero, J. (2005). “Modelling the non-linear response of Spanish electricity demand to temperature variations”. *Energy economics*, 27(3): 477-494.
- Pardo, A., Meneu, V., and Valor, E. (2002). “Temperature and seasonality influences on Spanish electricity load”. *Energy Economics*, 24(1): 55-70.
- Pfeifenberger, J. P., Spees, K., and DeLucia, M. (2013). “Evaluation of Market Fundamentals and Challenges to Long-Term System Adequacy in Alberta’s Electricity Market: 2013 Update”.
- ThermalCUBE (2011). “ice-battery”. www.thermalcube.com.
- Ueckerdt, F., Hirth, L., Luderer, G., and Edenhofer, O. (2013). “System LCOE: What are the costs of variable renewables?”. *Energy*, 63: 61-75.
- Vardoulakis, S., Dear, K., Hajat, S., Heaviside, C., Eggen, B., and McMichael, A. (2014). “Comparative Assessment of the Effects of Climate Change on Heat- and Cold-Related Mortality in the United Kingdom and Australia”, *Environmental Health Perspectives*, 122(12): 1285-1292.

ABSTRACT

Economic Value of Temperature-Sensitive
Demand Resources in the Electricity Market

Jiyoun Jang* · Wooyoung Jeon**

With the rapid increase in electricity consumption and the aggressive transition to a renewable energy-based power system, the traditional supply-oriented approach to supply-and-demand management is facing many challenges. As a result, demand-oriented solutions are drawing many attentions, and the importance of heating and cooling demand is increasing with its high potential for reducing peak demand. In this study, we used an econometrics model to estimate the hourly temperature-sensitive demand from aggregated electricity demand, and analyzed the impact of temperature-sensitive demand in reducing the cost of electricity supply when the temperature-sensitive demand resources are optimally utilized in the power system. Results show that the proportion of temperature-sensitive demand on peak demand days in summer and winter are estimated to be approximately 19.6% to 33.6% respectively, and the proportion of temperature-sensitive demand in peak hours on those days are estimated to be approximately 25.8% to 37.7% respectively. The total power supply cost is reduced by 0.8% to 2.5% when operating the power system by optimally utilizing the temperature-sensitive demand resources. The cost reduction effect of temperature-sensitive demand resources was greater in capacity costs rather than generation costs due to its capability of effective reduction of peak demand. Finally, it showed that the economic value of temperature-sensitive demand resources is more sensitive to operating efficiency of demand resources than to participation rates in demand response programs.

Key Words : Temperature-Sensitive Demand, Demand Resource, Virtual Power Plant, Smart Grid, Power Supply Cost

This work was supported by the Ministry of Education of the Republic of Korea and the National Research Foundation of Korea (NRF-2019S1A5A8033056)

* Graduate student, Department of Economics, Chonnam National University

** Associate Professor, Department of Economics, Chonnam National University
(Corresponding author), wyjeon@jnu.ac.kr

