

소비자 행동과 가격탄성을 고려한 스마트 그리드 수요반응 실시간 가격 결정 모델*

문 용 마[†]

서울시립대학교 경영대학 경영학부

Demand Response Real Time Pricing Model for Smart Grid Considering Consumer Behavior and Price Elasticity

Yongma Moon

College of Business Administration, The University of Seoul

■ Abstract ■

This paper proposes a real time pricing model for smart grid considering consumers' behavior, real time price elasticity, and exogenous price. Based on the proposed model, we found the weight of utility over cost is the most sensitive factor compared to other factors. Also, if the electricity price is set to be changed too sensitively to energy consumption, it is warned that real time pricing sometimes can cause increment of peak-time demand and volatility. Finally, real time pricing could be less efficient when the difference between the maximum and the minimum consumption level is small.

Keyword : Smart Grid, Real Time Pricing, Consumer Behavior, Price Elasticity

1. 서 론

2000년대 초반 미국 캘리포니아 주에서는 에너지

부족 현상으로 대규모 정전사태가 발생하고 전력
도매가가 800%까지 치솟은 적이 있었다[29]. 국내
에서도 최근 여유전력량이 10% 이하로 떨어지면서

논문접수일 : 2013년 04 05일 논문게재확정일 : 2013년 11월 26일

논문수정일(1차 : 2013년 04월 23일 2차 : 2013년 10월 18일)

* 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임
(NRF-2012S1A5A8022101).

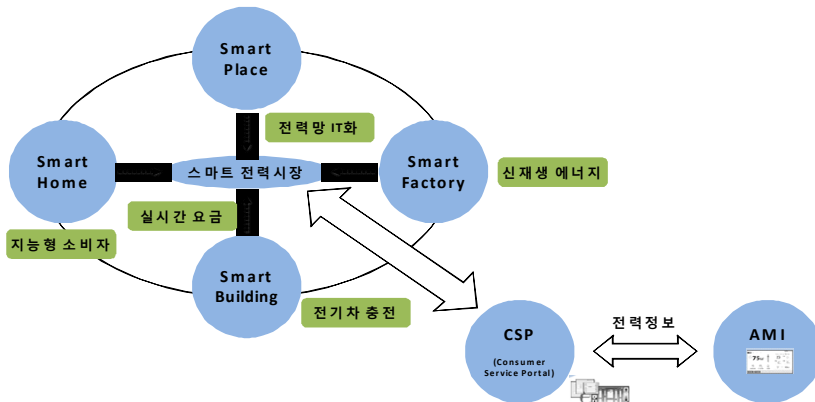
† 교신저자 yongma@uos.ac.kr

미국과 같은 대규모 정전 사태를 우려하고 있는 것이 현실이다. 이로 인하여 에너지 관련 산업에서는 새로운 변화를 꾀하고, 이에 대한 운영 방안을 제시하려고 하고 있다. 이러한 방안중의 하나로서 지능적인 차세대 전력망 구축의 스마트 그리드(smart grid)가 많은 관심을 받고 있다. 기존에는 전력을 단방향 전달체계를 통해 이용을 하였다면, [그림 1]과 같이 현재는 여러 정보시스템과 에너지 분산처리 및 저장 기술들을 이용하여 쌍방향 전력체계를 구축하려 하고 있다. 전력회사 이외의 장소에서 신재생 에너지원 등을 통해 전력을 생산하고 전력을 자체 해결함과 동시에 잉여전력은 스마트 전력시장에서 되팔 수 있어 온실가스 감축, 에너지 과소비 억제, 전력의 안정적 공급 등과 같은 이점을 가지고 있다. [그림 1]에서와 같이 전력시장을 통해 이러한 전력이 거래되고 이때의 가격 결정은 전기를 소비하려는 소비자와 공급원간의 수요와 공급, 외부환경에 의해 결정되고, 이를 통해 실시간 가격정책(RTP; real time pricing) 또는 요금제가 결정된다. 결정된 가격에 따라 소비자들은 전기소비를 조절하게 되고, 피크시간에는 비싼 가격이 책정되어 피크시간의 수요를 줄일 수 있는 수요평준화의 효과를 얻을 수 있으며, 궁극적으로 효율적인 에너지의 관리가 가능하게 된다.

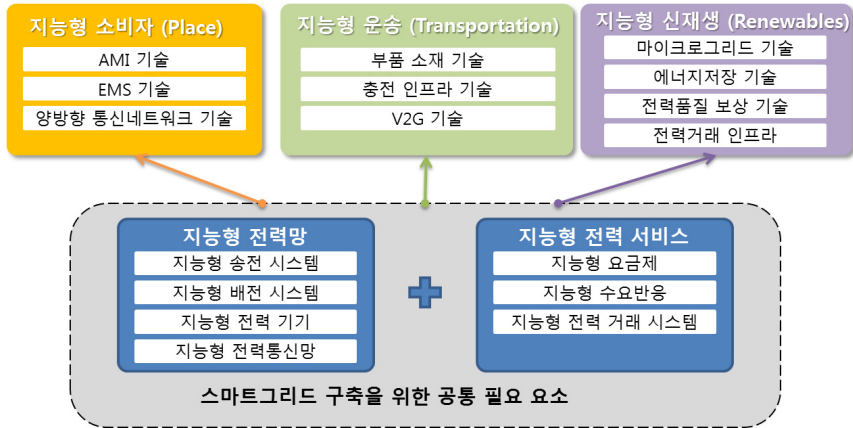
국내에서도 이러한 스마트 그리드에 대한 관심은

최근 상당히 높아졌다. 정부는 스마트 그리드 로드맵을 발표하고 아래 [그림 2]에서 명시된 바와 같이 5대 추진 분야에 대해 2030년까지 3단계 목표를 수립하고 총 27.5조 원을 투자할 계획이다[12]. 그러나 국내에서 현재까지 이루어진 실증단지 및 실증기술은 하드웨어 위주의 인프라 구축 기술에 그 초점이 맞추어져 있었다. 그러나, 기기들을 운용하기 위한 운영방안, 기술을 보완하기 위한 신규 서비스, 활용을 유도하기 위한 정책 및 신규 사업 등의 방안 마련은 아직 미비하다. 특히 전력의 효율화에 가장 중추적인 역할을 수행하는 수요반응(demand response) 시스템은 [그림 2]에서 볼 수 있듯이 스마트 그리드에서 다른 유형들의 공통 핵심 요인이다. 그러나 현재까지의 연구는 고종민 등[1]과 같이 과거의 데이터를 활용한 실증적이고 정책적인 연구들이 많았으며, 최적화된 가격을 결정할 수 있는 알고리즘과 이론적인 배경에 대한 연구들은 초기 단계에 불과하다. 이에 비해, 유럽의 경우는 최근 수요반응에 대한 연구의 중요성을 인정한 EU 정책가들에 의해 적극적으로 방안이 강구되고 있다[31].

그러나, 더욱 중요한 것은 수요반응은 소비자의 심리적인 행동에 의해서 그 효율성이 나타나게 되는 것임에도 불구하고 이를 반영한 연구는 현재까지는 이루어지지 않았다는 것이다. 또한, 이상적인 수요반응의 경우 완전 자율시장에서는 경쟁 하에



[그림 1] 스마트 그리드 시스템 개요[5]



[그림 2] 스마트 그리드 5대 추진 분야 및 공통 필요 요소

수요공급의 가격탄력성에 의해 가격 결정이 이루어지나, 현실에서는 기후, 정책 등의 외부 환경에 의한 결정이 큰 부분을 차지한다. 즉, 가격탄력성뿐만 아니라 외부환경에 의해 수요반응을 결정하는 모형이 필요하다. 그러나, 이 역시 지금까지의 연구에서는 찾아보기가 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 소비자의 행동과 가격탄력성 및 외부환경 고려한 수요반응 요금제의 실시간 가격 정책 결정에 대한 연구를 진행하고자 한다.

본 연구는 제 2장에서 수요반응의 요금제와 실시간 요금제에 대한 기존 문헌에 관하여 설명하고 기존 문헌에서 고려되지 못한 중요한 요소들에 관련된 연구들을 살펴보고, 이에 따른 본 연구의 의의를 기술한다. 제 3장에서는 기존에 고려되지 못한 요소를 반영한 새로운 수요반응 실시간 가격 모형을 도출한다. 제 4장에는 이 수리 모형을 토대로 시뮬레이션과 분석을 실시한다. 제 5장에서는 결론 및 본 연구의 한계점을 기술하고 향후 연구 방향에 대해 언급한다.

2. 문헌 연구

수요반응은 전력의 생산, 공급, 수요 상황, 피크 부하 등의 환경 변화에 따라 가격을 조정하고 이에 소비자가 반응해 전력 사용량을 조정하는 방법이다.

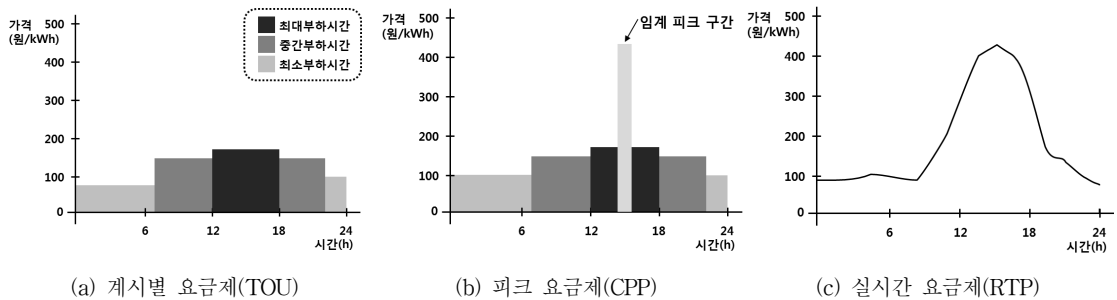
예를 들어, 한국전력의 경우는 특정 피크시간대에 전력 사용량이 집중되는 것을 막기 위해 인센티브를 제공하여 기업의 피크 수요를 상대적 여유가 있는 시간으로 유도하는 정책들을 시행하고 있다. 스마트 그리드에서는 실시간 가격정책을 수립하여 피크시간대는 전기 가격을 비싸게 책정하고, 그렇지 않은 시간대에는 전력을 저렴하게 제공하는 것을 그 철학으로 하고 있다. 이로 인해, 소비자들은 전기 가격이 낮은 심야에 조금 더 많은 전기를 소비할 수 있거나 피크시간대의 전력 소비를 심야시간으로 변경하여 전기사용료를 낮출 수 있고, 발전소의 입장에서는 피크시간대의 전력소비가 줄어 수요평준화가 일어나고 이로 인해 발전 용량을 줄일 수 있는 이점이 있다.

이러한 소비자의 수요변화를 유도하는 수요반응 프로그램은 크게 두 가지로 구분된다[15, 20]. 고정된 또는 시간에 따라 달라지는 인센티브를 제공함으로써 소비자의 반응을 이끌어내는 방식과 가격을 조정함으로써 수요를 조정하는 방식으로 구분된다. 첫 번째에 해당하는 인센티브 기반의 수요반응은 장비등을 통제하는 직접 통제(Direct control)방식, 정해진 수준까지는 할인된 가격으로 전기를 제공하고 어느 수준 이상이 될 경우 범칙금 등을 추가하는 차단/절감 방식(Interruptible/Curtailable), 용량에 대해 입찰을 하는 입찰/재구매 방식(bidding/buyback),

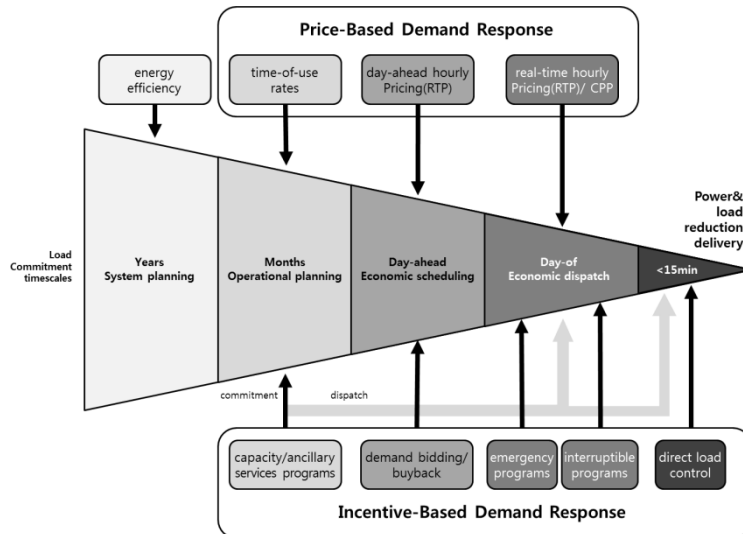
자원 부족이 예상되는 특정 기간에 직접 통제 방식과 차단/절감 방식을 복합적으로 사용하는 방식(emergency demand response) 등이 있다. 두 번째에 해당하는 가격 기반의 정책으로는 시간대별 차등 요금제(TOU; Time of Use), 임계 피크시간대별 요금제(CPP; Critical Peak Pricing), 실시간 요금제(RTP; Real-Time Pricing) 등이 있다. 계시별 요금제란([그림 3(a)]) 전력사용의 최소부하, 중간부하, 최대부하에 따라 그 요금이 달라지는 체계를 말하며, 피크 요금제란([그림 3(b)])과 같이 전력의 최대 피크 사용구간에 그 가격을 상대적으로 크게 결정하여, 전체 전력량의 피크 시간대의 사용량을 줄

일 수 있도록 하는 제도를 말한다. 실시간 요금제란 실시간 사용량([그림 3(c)])을 기반으로 수요에 따라 요금에 변화를 줌으로써 소비자들이 피크 시간대에는 사용을 줄이고, 평상시에는 저렴하게 사용할 수 있는 요금 체계를 의미하며, 스마트 그리드의 수요반응에서 지향하는 요금제이다.

이러한 다양한 방식의 수요반응 체계는 아래 [그림 4]에서와 같이 시간의 개념에서도 가격 기반의 방식과 인센티브 방식의 두 가지로 구분 지을 수 있을 것이다. 제주도 실증 단지에서의 방식은 가격 기반의 실시간 요금제를 하루 이전에 공시하고 이에 따라 소비자들이 반응하는 것을 유도하는 시스템



[그림 3] 다양한 가격 책정 방법[5]



[그림 4] 수요반응 체계 및 실시간 가격정책 구분[20]

템이었으나, 본 연구에서는 시간대 별 실시간 가격 책정을 목적으로 한다.

이러한 다양한 요금제에 대한 실증 결과를 보고 하는 연구들이 최근 발표되어 그 효과에 대해서 언급하고 있다. 김발호[2]는 캘리포니아의 전기체계를 기반으로 TOU, CPP/TOU, RTP, PTR(peak time rebate) 요금제도를 비교하고, RPT의 경우 약 5.9%의 전기요금 절감효과를 가질 수 있음을 시사하였다.

그러나 스마트 그리드 상에서의 가격 정책에 대한 수리 모형은 그렇지 많지 않다. 즉, 수요반응에 적용될 실시간 가격결정 수리 모형이 많지 않고, 비교 연구 또는 지엽적인 부분의 모형들만이 연구 되고 있는 상황이다. 실시간 요금제의 기본적인 개념으로 reactive power pricing에 관련된 연구들은 (예를 들면, Hao and Papalexopoulos[22]; Choi et al.[18]) 꾸준히 제시되고 비교 연구되어왔다. 또한, 신수진 등[7]은 경쟁상황에서 최적 경매 방법에 따라 가격을 결정하는 방식을 제안하거나 또는 김항석 등[6]과 같이 신경망 알고리즘을 이용하여 전기 가격을 예측하는 연구들이 제시되기도 하였다. 또한, Momoh[23]는 네트워크 기반의 수리모형을 제시하였다. 최태섭 등[13]은 Home Energy Management System에서 각각의 기기들이 연동되어 있는 상황에서 소비자가 느끼는 그 효용성을 최적화하는 방향을 제시하였다.

가격 정책에 대한 연구들이 최근 활성화 되기 시작하였다. Albadi and El-Saadany[15]는 social welfare를 최대화 하는 비용을 최소화 하는 모형을 발전시켰다. Samadi et al.[29]의 경우, 스마트 그리드를 위한 효용성을 극대화하는 실시간 가격 정책 모형을 개발하고 이로 인해 소비가 줄어드는 효과를 검증하였다. 유사하게 Conejo et al.[19]과 Ferreira et al.[21]는 가격의 불확실성을 고려하여 소비자 효용성과 비용의 트레이드오프를 고려하는 robust optimization모형을 개발하였다. 또한, 불확실성의 크기에 따른 변화를 기존 모형과 비교하였다. 다른 형태의 모형들에서는[15, 20] 가격탄력성(price elasticity)을 중점적으로 고려하고 있다. 또한, Ferreira

et al.[21]은 그 비용이 상호연관성을 가질 때, 변화 하는 모형을 개발하고 실험하였다. 이러한 관점들은 대부분 소비자의 입장에서 개발된 모형들인데 반해, Bu et al.[16]은 전기 소매자들이 시장에서 경쟁을 하는 모형을 바탕으로 조달과 가격 결정에 어떠한 요소들이 영향을 미치는 것인지를 연구하였다. 이러한 연구들에서 공통적으로 적용이 되는 항목들을 고려하면 다음과 같은 수리 모형으로 정리될 수 있다.

$$\begin{aligned} \text{Min } & \sum_{t=1}^T \{ \lambda_t \cdot e_t - u_t(e_t) \} \\ \text{s.t. } & \sum_{t=1}^T e_t = e_w \\ & e_{t,\min} \leq e_t \leq e_{t,\max} \quad \forall t \in \{1 \dots T\} \\ & u_t(e_t) \leq f(e_t) \quad \forall t \in \{1 \dots T\} \end{aligned}$$

여기서, λ_t , e_t , u_t , e_w , $e_{t,\max}$, $e_{t,\min}$, f 는 각각 시간 t 의 가격, 전기 소모량, 효용, 총소비량, 최소 및 최대 소비량, 효용 함수를 의미한다. 여기서 효용 함수는 에너지를 소비함에 따라 소비자들의 만족도와 같은 효용(utility)이 증가하는 것을 의미하고, 소비가 많을수록 소비자의 효용이 증가하는 것을 가정한다. 다시 말해, 주어진 최소 소모량과 최대 소모량 사이로 전기를 소모할 수 있다는 전제하에서 효용과 전기 가격의 값을 최적화 하는 최적 소비량을 도출하고자 하는 것이다.

그러나, 기존의 연구들은 소비자들의 행동양식과 가격에 대한 탄력성 및 외부효과를 동시에 고려하지 않았다. 기존의 모형의 경우 가격이 올라가거나 내려간다고 했었을 때, 그 사용량을 직접적으로 줄이거나 늘릴 것으로 판단한다. 즉, 이러한 모형은 소비자들이 절대적인 가격만을 보고 판단하는 경우를 전제로 한다. 그러나, 일반적으로 소비자들의 물건 구매 행동으로 비유한다면, 절대적인 가치를 가지고 물건을 구매하기도 하나 기준가격(reservation price)으로 물건을 구매할 때 본인이 생각하는 물건의 가치와 가격을 비교함으로써 그 차이가 양(+)이면 구매를 하지 않고, 음(-)이면 구매를 한다. 이와 유사하게 소비자들은 전기의 가격을 보고 그 소비량을

결정하기도 하지만, 가격의 변동을 보고 합리적인 범위의 변동일 경우 소비량을 조절하기도 한다. 예를 들면, 현재 200원/kWh일 때, 기존 최대 월 사용량이 300kWh라고 하자. 이 때, 가격이 180원/kWh로 떨어진다면, 전기 가격이 저렴해지기 때문에 최대 월 사용량을 330kWh로 올려 소비자의 효용성을 최대화 할 수 있을 것이다. 그러나, 또다시 가격이 160원/kWh로 떨어진다면, 360kWh이 아니라, 다음에 또 떨어질 것을 기대해 370kWh 정도까지 써도 되지 않을까 하는 생각을 하게 된다. 이는 마케팅이나 유통채널관리, 협상(negotiation) 등 구매에 있어서 흔히 나타나는 현상이다[17, 27]. 즉, 기존의 수요공급 곡선만을 사용한다면, 이러한 현상을 전기사용의 최대 허용치에 대한 소비자 행동양식을 고려하기 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 소비자들의 전기사용의 최대 허용치에 대한 변화를 수용하는 모형을 개발하고 이에 따른 분석을 실시한다.

또한, 기존의 연구들은 외부 효과와 소비자의 사용에 따른 변수의 두 가지를 동시에 고려하지 못하였다. 국내의 경우, 가정용 전기는 사용하는 총 전기 소모량의 14.6%, 상업용은 27.2%, 산업용은 54.0%, 공공용은 4.2%를 사용한다[11]. 이는 국가 전체적으로 수요반응 체계를 도입했을 때, 가격의 변동은 가정용에 대한 효과보다 산업용에 그 효과가 더욱 클 것을 의미한다. 또한, 날씨 등이나 근무 시간에 따른 피크 시간대 등을 고려하였을 때, 외부에 의해 결정되는 부분이 있을 것이고 이는 전체적으로 전력 소비 패턴을 변화시킨다. 동시에, 소비자들의 전력 소비량에 따라 다음 시간대의 전기 가격이 변경되는 상황도 존재한다. 그러나, 기존의 모형들은 전기 가격을 단순히 외부의 효과만을 고려하여 결정되어 있는 상수나[21] 소비에 의해 결정되는 가격탄성만을 고려한 모형을[20] 제시하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 외부의 효과 및 소비자의 사용량에 따른 변화량을 동시에 고려한 모형을 제시하고자 한다.

이 두 가지를 종합하여, 본 연구는 기존 연구와는 달리 스마트 그리드 하의 가격변동에 따른 소비자들의 심리에 따른 소비 형태의 변화를 수용하고, 예

지 사용량의 변화에 따른 가격의 변동 및 외부효과를 동시에 고려하였다. 이러한 모형을 바탕으로 효용성의 비중이 다른 변수들에 비해 중요함을 시사하고, 소비에 따라 전기 가격이 과도하게 민감하게 변하면 오히려 피크타임의 수요를 올리고 변동성을 키울 수 있음을 경고한다. 또한, 이러한 실시간 가격정책은 최대 허용 소비량과 최소 소비량의 차이가 작은 경우는 그 효과가 미미할 수 있음을 시사한다.

3. 수요반응 최적화 모형

이 장에서는 새로운 에너지 소비 최적화 모형을 제시하고자 한다. 제 2장에서 언급된 바와 같이 본 연구에서는 Conejo et al.[19]과 Ferreira et al.[21]의 모형을 기반으로 확장하였다.

3.1 변수 정의 및 가정 사항

본 수리 모형에서 설정한 주요 변수 및 파라미터에 대한 정의와 이에 대한 설명은 다음과 같다.

$\lambda(t)$ = 주어진 시간 t 의 전기 가격

$e(t)$ = 주어진 시간 t 의 에너지 소비 변수

e_{sum}^{min} = 시간 $[0, T]$ 사이에 소비되는 전력의 최소값

$e^{min}(t)$ = 주어진 시간 t 에 소비되는 전력의 최소값. 최소 사용량

$e^{max}(t)$ = 주어진 시간 t 에 소비될 수 있는 전력의 최대값. 최대 허용 사용량

$\alpha(t)$ = 전력소비에 대한 에너지 가격의 민감도

$\gamma(t)$ = 기초 최대 전력 소비량

$\delta(t)$ = 소비자들의 전력가격에 대한 전력소비 민감도

$u(e(t))$ = 에너지 소비에 따른 효용 함수

$\psi(t)$ = 전기 가격을 결정하는 외부 효과를 나타내는 함수

t = 시간, $t=1, 2, \dots, T$

전기 가격($\lambda(t)$)은 기 언급된 바와 같이 기존의 연구와는 달리 소비자들의 소비량과 외부의 효과에

따라 변화하는 변수로 설정되었다. 기후의 변화, 타 산업 분야에서 사용하는 에너지 소비량 등에 의해 가정 수용가에서 사용하는 가격은 영향을 받을 것이고 동시에 가정에서 사용하는 전력 소비량에도 동시에 영향을 받도록 설계되었다. 또한, $e(t)$ 는 시간대별 에너지 소비량을 의미하고, 가정에서 사용이 되는 가전기기들을 고려할 때, 시간 $[0, T]$ 사이에 e_{sum}^{min} 만큼의 전기를 최소한 소비하고 각 시간대별로 $e^{min}(t)$ 이상 소비될 것이라는 가정을 하였다. 또한, 사용할 수 있는 에너지 상한은 $e^{max}(t)$ 로 설정되었다. $u(e(t))$ 는 에너지 효용함수로서 에너지 소비를 얼마만큼 하는가에 따른 소비자가 느끼는 효용함수이다. 마지막으로 $\alpha(t)$, $\psi(t)$ 는 전기 가격($\lambda(t)$)을 설명하는 파라미터 값이고, $\gamma(t)$ 와 $\delta(t)$ 는 에너지를 소비량 $e(t)$ 에 대한 파라미터 값이다. 이에 대한 자세한 설명은 다음 절들에서 설명하도록 한다.

본 연구는 시간 단위의 실시간 가격 정책을 가정한다. 제 2장에서 소개한 하루 전 공시되는 실시간 가격 정책 방법도 있으나 본 연구는 조금 더 진보한 정책을 고려하였다. 또한, 현실적으로 외부효과에 대한 함수($\psi(t)$)는 하루 전에 과거의 데이터를 바탕으로 예측이 될 수 있고 이는 주어지는 함수로 가정한다. 그리고, 최적 수요 반응 모형을 설계할 때, 기존 문헌들과 같이 단일 수용가를 고려하였으나, 주택, 상업, 가정, 공공 등의 특정 수용가에 제한을 두지 않고 이는 일부 변수들을 바꿈으로써 다른 수용가들에 대해 활용 가능하다.

3.2 목적식

수리모형의 목적식은 Conejo et al.[19], Ferreira

et al.[21]의 연구에서와 유사하게 다음과 같이 표현된다.

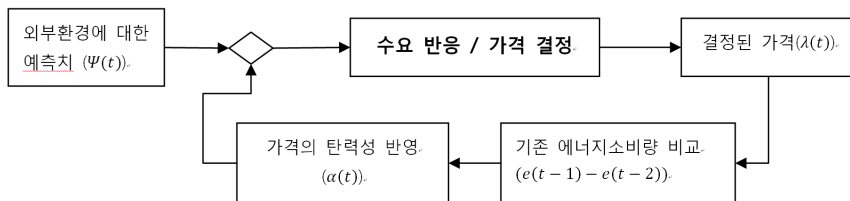
$$\min \sum_{t=1}^T \{ \lambda(t)e(t) - u(e(t)) \}$$

여기에서 효용함수 $u(e(t))$ 는 $u_1 \log(u_2 e(t) + u_3)$ 의 형태로 가정한다. 이는 소비자들의 효용은 전력 소비량에 정비례하여 증가하기보다는 점차적으로 효용성 증가폭이 작아지는 것을 가정한다. 이는 Ferreira et al.[19]는 piecewise 선형 함수로 구간별로 증가폭이 작아지는 것을 가정한 것과 Roozbehani et al.[26]의 log함수를 사용한 것과 유사하다. $\lambda(t)e(t)$ 는 소비자들의 효용성은 전기 소비에 대한 비용이 올라갈수록 그 효용성이 떨어지는 것을 의미한다. 또한, 소비자들은 이 두 가지의 트레이드오프를 고려하여 최적의 효용성을 이끌어내는 것이 목적이 될 것이다.

3.3 가격 결정 제약식

본 연구에서 제약식을 구성하는데 기존의 연구들과 다르게 모형화한 부분이 가격 결정 제약식이다. 기존의 수리들은 가격은 주어진 함수로 가격을 결정하거나[17, 19], 순수 가격탄력성만을 고려한 모형[13, 18]을 사용하였다. 그러나, 실시간 가격정책을 채택할 경우, 전 시간대에 소비하는 전력량에 따라 가격은 실시간으로 변해야 하고, 동시에 외부의 환경에 따라 그 가격은 달라질 것이다. 아래 [그림 5]와 같이 가격을 산정하는데 있어서 예측되는 외부환경 요소와 소비자들이 사용하는 사용량에 따른 가격의 변동에 대한 모형이 요구된다.

이러한 모형에 대해 첫 번째로 에너지 소비량이



[그림 5] 제안된 수요반응 및 가격 결정 방법

증가하는 추세에 있다면, 그 비용을 올려 수요를 조절할 필요가 있을 것이다. 이는 전 시간대와 그 전 시간대의 에너지 소비량 $\{e(t-1)-e(t-2)\}$ 비교하여 증가하는 경우 $\alpha(t)$ 만큼의 비용을 증가시킬 필요가 있을 것이다. 두 번째로, 전기의 가격은 다른 외부 효과에 의해서 결정된다. 예를 들면, 일과시간에는 전력소비가 자연스레 많을 것이고, 기후 등에도 영향을 받을 것이다. 또한, 국내의 경우 정책상, 가정용, 상업용, 산업용, 공공용 등의 구분을 지어 가격을 결정하는데, 상업용 및 산업용이 상대적으로 약 전체소비의 14.6%를 사용하는 가정용 수용가에 비해 큰 비중을 차지하고 있고 이러한 요소에 의해 가정용 전기 가격은 영향을 받을 것이다. 이에 외부 환경에 의한 가격 결정을 고려하지 않을 수 없고, 외부 환경에 의한 영향인자에 대한 함수를 $\psi(t)$ 라고 정의한다. $\psi(t)$ 는 전기 가격의 일부분으로서 이 유수 등[8]에서와 같이 GDP 수준, 소매시장 및 도매시장개방, 원자재 비중, 조세 등에 의해 결정되는 부분과 기후 및 정책 등에 의해 결정이 되는 부분으로 일정 시간 전에 기존의 데이터들을 바탕으로 예측되는 부분을 의미하고, 이는 일반적인 회귀식을 통해 얻어질 수 있다.

앞에서 언급된 이 두 가지 요인을 동시에 고려하여 다음과 같은 제약식을 도출하였다.

$$\lambda(t) = \alpha(t)e(t-1) - e(t-2) + \psi(t), \text{ for } t = 3, 4, \dots, T$$

3.4 에너지 소비 제약식

소비자들은 에너지 소비에 있어 각자의 제약사항들이 존재한다. 소비자들의 최소 및 최대 소비량이 제약조건으로 작용한다. 소비자들은 가구별로 사용해야 하는 기본적인 가전제품들이 존재하고 이에 대한 최소 소비량이 존재한다. 그래서, 이에 대한 시간대별 최소 소비량($e^{min}(t)$)을 정의할 수 있고 이는 기존 연구와 유사하게 외생변수(exogenous variable)로 결정될 수 있다. 또한, 소비자들이 에너지를 사용할 시 최대 사용할 수 있는 최대 에너지 소비량($e^{max}(t)$)을 정의할 수 있다.

그러나, 많은 기존의 연구[18, 19, 24]에서는 이를 상수로 정의하였으나, 본 논문에서는 실시간 수요반응 모형의 특성과 이에 따른 소비자들의 심리적 변화를 수용한 모형을 제시한다. 기본적으로 소비자들은 전기를 시간대 별로 최대 어느 정도를 소비할지에 대한 기초 최대 전력 소비량($\gamma(t)$)을 가지고 있다. 그러나, 스마트 그리드에서는 실시간 가격정보의 공유가 가능해지고 소비자들이 그 실시간 가격이 변동을 보고 기초 최대 전력 소비량의 심리적인 변화를 갖게 된다. 소비자들은 가격의 변동에 따라 최대 소비량의 변화를 가져올 수 있다. 예를 들어, 전 시간의 가격이 $\lambda(t-1)$ 로 책정이 되었고 현재 전력가격이 $\lambda(t)$ 로 책정되어 있을 때, $\lambda(t-1)$ 이 $\lambda(t)$ 보다 크다면 소비자는 저렴한 에너지를 더 사용하려고 할 것이고, 반대의 경우는 가격이 오른 에너지 소비를 줄이려고 할 것이다. 소비자들에 따라 $\delta(t)$ 만큼 추가 사용 가능 양을 조절하고 결국 $\delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 이 초기에 생각했던 기초 최대 전력 소비량($\gamma(t)$)에 더해지는 형태가 된다. 이에 기존 연구에서는 $e(t) \leq e^{max} = \gamma(t)$ 로 제한되었던 제약식을 본 논문에서는 $e(t) \leq e^{max} = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 로 확장하였다.

전력관련 기존 논문에서는 이러한 모형이 거의 존재하지 않았으나, 마케팅이나 유통채널관리, 협상(negotiation)문제에서는 소비자의 심리를 반영한 수리모형들이 적용되고 있다[17, 26]. 예를 들면, 소비자들이 제품을 구매할 때 비용의 절대값에 따른 구매여부를 결정하기도 하지만, 실제로 기준가격(reservation price)을 기준으로 제품에 대한 가치(value)를 상대적으로 비교하여 크면 구매하고 그렇지 않으면 구매하지 않는 것과 같다. [그림 6]에서 전통적인 방식으로는 100원이기 때문에 수요가 200개라는 식의 수요 공급곡선의 교차점으로 산출하기보다, 현재 가격이 100원이나 100원 이상의 가치로 생각하는 소비자들이 200명 분포해있기 때문에 200개라는 접근법이고 이는 수요가 가격의 절대치만이 아니라 소비자의 제품에 대한 가치판단과 실제 제품의 가격의 비교로부터 산출 된다는 것을 설명하기 위한 것이다. 다시 말

해, 전기 가격이 떨어졌을 때, 전기 가격이 본인이 판단한 가치보다 더 낮을 경우 소비자들은 평상시보다 조금 더 사용해도 괜찮을 것이라는 심리적인 효과가 발생할 것이고, 이에 따라 최대 사용할 수 있는 범위가 확장 될 수 있다. 이는 Moon et al.[27]에서는 물건 구매 협상 과정에서 협상이 이루어질 수 있는 타협가능영역(zone of possible agreement)이 소비자들의 구매심리에 따라 확장이 될 수 있다는 결과와 유사한 것이다.

즉, e^{max} 에서 가격의 변동에 따라 변화량의 일정 부분($\delta(t)$)만큼 한계 소비량이 늘어나거나 줄어드는 모형이 된다. 여기서, $\delta(t)$ 는 소비자들의 가격 변화에 대한 민감도로 정의될 수 있다. 이는 스마트 그리드 하에서 소비자가 가격의 정보를 알 수 있고, 이에 따라 자신의 에너지 소비량을 통제할 수 있다는 특징을 반영한 모형이라고 할 수 있다. 또한, 기존의 연구 Mohsenian-Rad and Leon-Garcia [23]와 Ferreira et al.[21]에서와 같이 주어진 기간 내의 $t \in \{1, T\}$ 에너지 총 소비는 e_{sum}^{min} 으로 기초 소비전력으로 정해져 있다고 가정하였다. 이러한 제약식들은 아래의 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$e(t) \leq e^{max} = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$$

$$\text{for } t = 2, 3, \dots, T$$

$$\sum_{t=1}^T e(t) \geq e_{sum}^{min}$$

$$e(t) \geq e^{min}(t) \quad \text{for } \forall t$$

3.5 수요반응 실시간 가격 정책 모형

앞에서 수립된 수리 모형들을 종합하면 소비자들의 관점에서의 실시간 가격정책에 대한 수요반응 모형은 다음과 같다.

$$\text{Min } \sum_{t=1}^T \lambda(t)e(t) - u(e(t))$$

$$\text{s.t. } \lambda(t) = \alpha(t)\{e(t-1) - e(t-2)\} + \Psi(t)$$

$$\text{for } t = 3, 4, \dots, T$$

$$\sum_{t=1}^T e(t) \geq e_{sum}^{min}$$

$$e(t) \geq e^{min}(t), \quad \forall t \in \{1, T\}$$

$$e(t) \leq e^{max}(t) = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$$

$$\text{for } t = 2, 3, \dots, T$$

$$u(e(t)) = u_1 \log(u_2 e(t) + u_3)$$

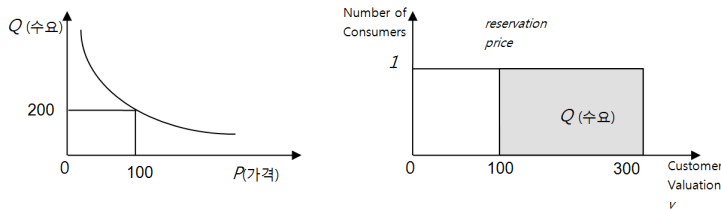
$$e(t) \geq 0, \quad \forall t \in \{1, T\}$$

$$\lambda(t) \geq 0, \quad \forall t \in \{1, T\}$$

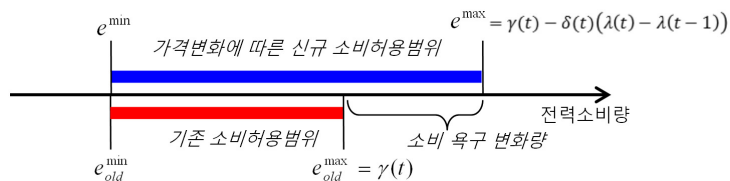
$$\lambda_1 = \lambda(1), \quad \lambda_2 = \lambda(2)$$

$$e_1 = e(1)$$

where $\alpha(t) \geq 0, \beta(t) \geq 0, \delta(t) \geq 0$ and $\gamma(t) \geq 0$.



[그림 6] 전통적 수요공급곡선(좌)과 소비자 행동을 반영한 수요함수(우)



[그림 7] 기존 모형 소비허용범위와 제안된 모형 소비허용범위

4. 수리 모형 시뮬레이션 및 분석

이 장에서는 수리 모형에 대해 시뮬레이션을 실시하고, 파라미터 값들의 변화에 따른 수요반응의 형태에 대해 분석한다.

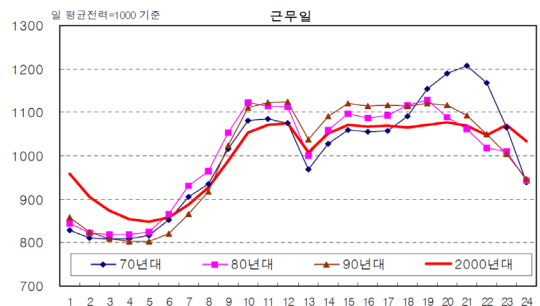
4.1 데이터

시뮬레이션을 위해 MATLAB/GAMS를 사용하였고, solver로는 MINOS를 선택하였다. 수리 모형을 통해 실험을 실시하기 위한 파라미터는 다음 <표 1>과 같다. 기준 예제에서 사용되는 파라미터 값들은 소비자들의 전력소비를 바탕으로 유추되거나, 임의로 선정하였다. 첫 번째로, 최소 소비전력 ($e^{min}(t)$)은 [그림 8]에서와 유사한 데이터를 생성하기 위하여 <표 1>에서 나타난 수식을 통해 데이터를 생성하였다. 다음으로 최대소비 허용량($e^{max}(t)$)¹⁾은 $\gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 으로 표현되는데, 이 중 $(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 는 변수에 해당하는 부분이므로, $\gamma(t)$ 과 $\delta(t)$ 에 대한 부분을 가정할 필요가 있다. 이에 대해 기준 예제에서는 최소 대비 20% 정도의 전력을 더 소비할 수 있을 것이라는 가정하에 $\gamma(t)$ 의 값을 $e^{min}(t)$ 의 1.2배로 설정하였다. $\delta(t)$ 값의 경우 전기소모 변화량 대비 10% 영향을 미치는 것으로 가정하였다. 최소사용량(e_{sum}^{min})은 아래 [그림 8]에서 보는 바와 같이 시간별로 일평균 전력기준 1000 사용량을 기반으로 240000정도를 사용하는 것을 가정하였다. 단위는 Wh로 한다. 또한, $\lambda(t) = \alpha(t)\{e(t-1) - e(t-2)\} + \psi(t)$ 에서 가격의 기본이 되는 $\psi(t)$ 는 100kWh~300kWh 사용구간 전기 가격이 현재 122.6원/kWh~183.0원/kWh으로 책정된 것과 12시를 기준으로 주간 시간대에 전기비용이 비싼 것을 바탕으로, $150 - 0.5 \times (t-13)^2$ 의 함수로 가정하였다. $\alpha(t)$ 의 경우, 개인의 사용량의 변화가 전체의 가격에 영향을 미치는 것을 의미하는데, 이는 상당히 미미할 것으로

판단하고 0.015의 값을 가정하였다. 마지막으로 효용함수($u(e(t)) = u_1 \log(u_2 e(t) + u_3)$)를 구성하는 u_1, u_2, u_3 는 각각 145000, 1, 1로 각각 가정하였다. 이는 목적식의 $\lambda(t)e(t) - u(e(t))$ 에서 비용($\lambda(t)e(t)$)에 비해 상대적으로 효용의 가치($u(e(t))$)가 얼마인가를 결정하는 파라미터로서 실제 데이터와 실험을 통해 결정돼야 하나 기존 연구가 거의 이루어지지 않아 본 연구에서는 임의로 가정하였다. 대신, 시뮬레이션을 시행했을 때 가장 크게 영향을 미치는 다양한 u_1 에 대해 실험을 실시하였다. 또한 $e^{min}(t)$ 은 KPX 수요예측팀[14]에서 언급한 바와 같이 1990년도와 2000년대 사이 15시에 연 최대 전력이 발생하였으나, 2000년대 이후 적극적인 수요관리 때문에 오전 12시로 일부 이동하였다는 것을 바탕으로 실제 소비요구는 15시 근처에서 발생하는 것으로 고려하여 함수를 $\frac{e_{sum}^{min}}{T} \cdot 0.9 \times (t-16)^2$ 로 가정하였다. 다음 절들에서는 이 기준 예제의 중요한 변수들을 바탕으로 실험을 실시하여, 얻어지는 결과를 바탕으로 시사점들을 도출한다.

<표 1> 기준 예제의 시뮬레이션 파라미터 값

파라미터	값	파라미터	값
α	0.015	e_{sum}^{min}	24000
$\psi(t)$	$150 - 0.5 \times (t-13)^2$	u_1	145000
δ	0.1	u_2, u_3	1
최대 소비 허용량 (γ/e^{min})	1.2	$e^{min}(t)$	$\frac{e_{sum}^{min}}{T} - 0.9 \times (t-16)^2$



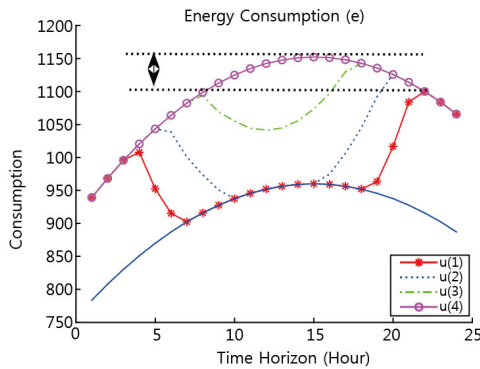
[그림 8] 평균 전력 사용[14]

1) $e^{max}(t) - \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 에서 $\gamma(t)$ 를 e^{min} 의 배수로 산정하여, 최대 소비허용량의 정도를 γ/e^{min} 으로 산정하여 비교하였음.

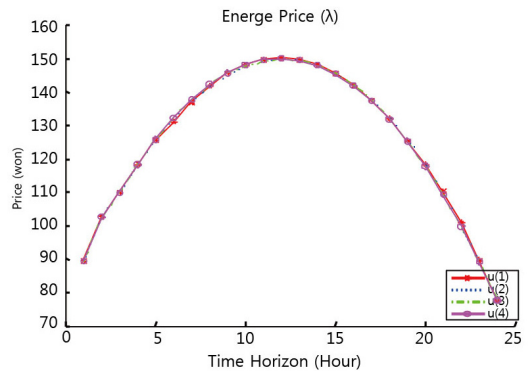
4.2 소비자 효용성에 대한 분석

앞에서 언급된 바와 같이 일반적으로 전기를 사용함으로써 얻어지는 효용성과 지불해야 하는 비용에 대한 트레이드오프가 존재한다. 두 가지의 트레이드오프는 u_1 의 값의 증감으로 표현될 수 있다. 예를 들면, 소비자들이 비싼 가격에도 불구하고 에너지를 소비하고자 하는 경우 u_1 의 값이 상대적으로 높아진다. [그림 9]에서 첫 번째 그래프(a)는 시간에 따른 에너지의 소비가 어떻게 이루어지는가에 대한 결과 그래프이고, 두 번째 그래프(b)의 경우 시간에 따라 에너지 가격이 어떻게 변화하는지에 대한 그림이다. 세 번째 그래프(c)는 효용의 상대

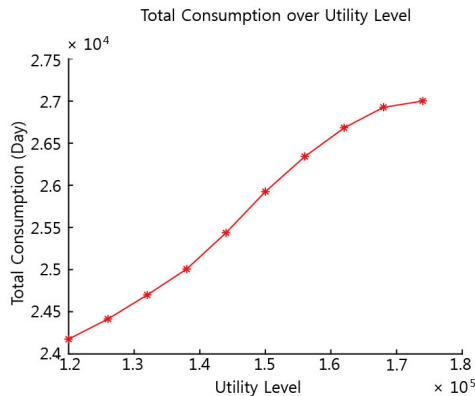
적 중요도(u_1)가 커짐에 따라 하루 총 에너지 소비량이 어떻게 변하는지에 대한 결과이다. [그림 9(a), (b)]에서 그래프는 $u(1)$ 은 낮은 $u_1 = 120000$ 때의 결과이고, $u(2)$ 는 $u_1 = 138000$, $u(3)$ 은 $u_1 = 156000$, $u(4)$ 는 높은 $u_1 = 174000$ 일 때의 결과이다. [그림 9(a)] 결과에 따르면, 에너지 소비에 대한 선호도가 높아지면 높아질수록, 즉 u_1 값이 커지면 커질수록, 그래프는 최대 사용 허용치($e^{max}(t)$)에 가깝게 표현되면서 에너지 소비가 늘어나는 것으로 쉽게 알 수 있다. $u(4)$ 의 경우에 비해 $u(1)$ 의 경우는 피크타임의 소비는 상당히 축소되는 것으로 알 수 있다. 즉, 비용에 민감한 소비자들일수록 피크타임의 소비를 줄일 수 있음을 확인하였다. 또한, 동시에 [그림



(a) 에너지 소비



(b) 에너지 가격



(c) 총에너지 소모량

[그림 9] 효용의 상대적 중요도(u_1) 변화에 따른 분석

〈표 2〉 소비자 효용성의 중요성 증가에 따른 소비 변동량

Utility level (u_1)	120000	126000	132000	138000	144000	150000	156000	162000	168000	174000	총계
소비 변동량(%)	N/A	0.99	1.17	1.23	1.72	1.93	1.61	1.29	0.91	0.28	10.47

9(b)]에서는 미묘하나마 가격에 대한 변화가 존재함을 확인하였다.

[그림 9(c)]는 효용의 상대적 중요도(u_1)의 값이 변화함에 따라 총 전력 소비량이 급격히 증가함을 보여 주고 있다. 이를 수치로 표현하면 <표 2>와 같다. 이는 소비자 효용의 상대적 중요도가 높아질 때, 총 전력 소비량이 증가하는 양(소비 변동량)을 백분율로 환산한 결과이다. 여기에서 볼 수 있듯이, 소비 변동량은 u_1 이 120000에서 174000으로 변화하였을 때, 총 10.47%까지 증가하고 있음을 알 수 있다. 물론, 이 변동량이 작다고 판단할 수 있으나, 추후 다음 절들에서 시뮬레이션에서 보여질 변동량에 비하면 상당히 큰 수치임을 알 수 있다. 이는 소비의 변동량에 이는 소비자들의 소비에 대한 효용성의 증가가 상당한 영향을 미치고 있음을 보여준다. 스마트 그리드를 실증하거나 실시간 요금제를 도입을 검토할 때의 가장 중요한 요소 중의 하나가 바로 소비자들의 가격에 대한 상대적인 중요도를 어느 정도를 가지고 있는가가 중요함을 설명한다고 할 수 있다. 다시 말해, 소비자들이 높은 u_1 을 가지고 있을 때는 실시간 요금제를 통해 스마트 그리드의 효과를 극명히 볼 수 있지만, 그렇지 못한 경우에는 수용반응의 실시간 요금제의 효과가 크지 않을 수 있음을 시사한다. 김성진[3]과 조은호[10]의 연구에서 언급한 바와 같이, 제주지역에서 대규모 수요반응의 한계를 체감한 사례와 상업 지구에 에너지 관리시스템을 구축하고 에너지 절감 효과를 얻은 사례에서의 실패와 성공은 이러한 측면에서의 해석이 가능하다. 상업지구의 경우 상대적으로 비용에 중요도를 가지고 있을 것이고(낮은 u_1 값), 일반 가정의 경우는 상대적으로 에너지 소비에 대한 효용이 높을 것이다(높은 u_1 값). 결과적으로 상업지구는 [그림 9]의 u(1)의 경우와 같이 피크타임의 소비를 적극적으로 줄이는 효과를 얻을 수 있었을 것이

다.

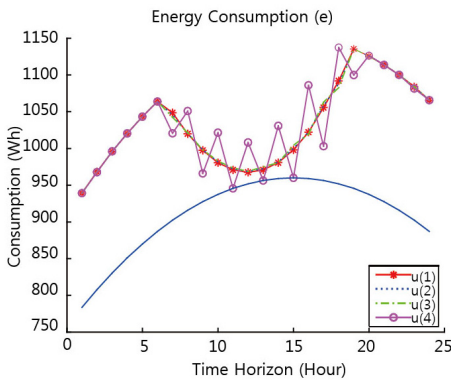
이에 비해 가격에 대한 변화는 상당히 미미한 것으로 확인되었다. 소비자들의 효용성에 대한 비중이 어느 정도인가는 가격의 결정에 있어서 그리 크게 영향을 미치지 않는 것으로 유추될 수 있다. 이는 외부효과($\psi(t)$)가 상대적으로 크기 때문에 나타나는 것으로 해석된다.

4.3 전력소비에 대한 가격의 민감도($\alpha(t)$)에 따른 분석

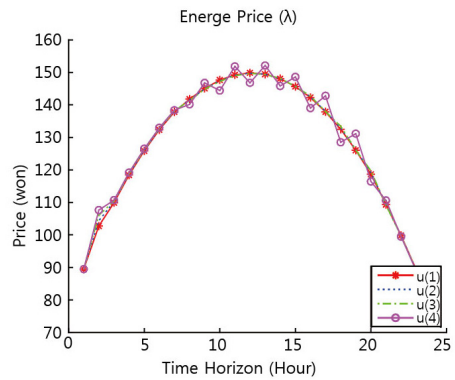
이 절에서 분석될 가격의 민감도는 가격결정 제약식 $\lambda(t) = \alpha(t)\{e^{(t-1)} - e^{(t-2)}\} + \psi(t)$ 에서 $\alpha(t)$ 를 의미한다. 소비자들의 소비에 따른 변화가 가격에 영향을 많이 미칠 수도 있고, 그렇지 못한 경우가 존재한다. 예를 들면, 소비 주체 별로 보았을 때, 일반 가정 소비자는 전체 가격에 미치는 영향력은 상대적으로 상업, 산업 주체에 비해 그 영향력이 작을 것이다. 이에 이 절에서는 소비자들의 전력 소비량이 가격에 영향을 미치는 정도를 기반으로 민감도 분석을 실시한다. 제 4.2절에서 본 것과 같이 $\alpha(t)$ 값이 0.015일 때는 가격의 변동이 미미하였다. 그래서, $\alpha(t)$ 값을 0.015에서 0.042의 값으로 임의로 변화시켜가며 실험을 진행하였다. [그림 10]에서 첫 번째 그래프(a)는 시간에 따른 에너지의 소비가 어떻게 이루어지는가에 대한 결과 그래프이고, 두 번째 그래프(b)의 경우 시간에 따라 에너지 가격이 어떻게 변화하는지에 대한 그림이다. 세 번째 그래프(c)는 가격의 민감도($\alpha(t)$)가 커짐에 따라 하루 총 에너지 소비량이 어떻게 변하는지에 대한 결과이다. [그림 10(a), (b)]에서 그래프는 u(1), u(2), u(3), u(4)는 각각 $\alpha(t) = 0.015, 0.024, 0.033, 0.042$ 일 때의 결과이다.

$\alpha(t)$ 값이 커졌을 경우(u(4)), 앞 절에서의 결과와는 달리 [그림 10(b)]와 같이 전기 가격의 변화도 크게 나타났고, [그림 10(a)]와 같이 소비의 변동성이 크게 변화하였다. 이 분석에서 흥미로운 부분은 비용의 변동성 보다 비용에 따라 소비의 변동이 더욱 커졌다는 사실이다. 즉, 가격의 변화에 따라 레버리지 효과로 전기 소비량이 더 크고 민감하게 반응하였다. 소비는 $e(t) \leq e^{max}(t) = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 으로 표현되고 최대 소비허용량($e^{max}(t)$)의 범위 내에서 선택할 수 있기 때문에, 소비자 자신의 목적함수를 최대화 하는 전략으로 전기 사용량($e(t)$)을 전기가 쌀 때와 비쌀 때를 구분하여 많이 사용하고 적게 사용하는 것으로 결정하나, 가격은 $\lambda(t) = \alpha(t)\{e(t-1) - e(t-2)\} + \psi(t)$ 로서 결정된 전기 사용량의 변화

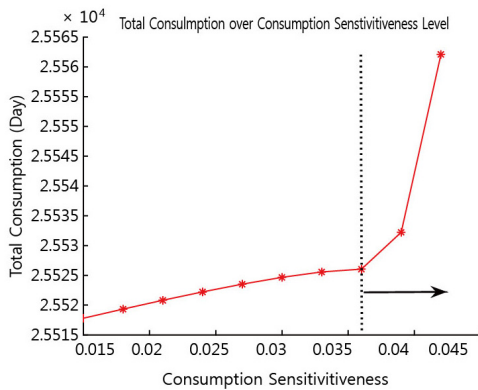
($e(t-1) - e(t-2)$)에 $\alpha(t) = 0.045$ 를 곱한 값으로 자동적으로 결정이 되기 때문에 변동성이 0.045만큼 축소되게 된다. 다시 말해, 소비자의 입장에서 가격의 변화에 따라 민감하게 자신의 목적에 맞게 최적화하는 전기 사용량을 결정하고, 이러한 소비자의 행동이 다시 가격의 변동으로 이어지게 된다. 그러나, 가격의 변동이 소비의 변동보다 축소되어도 소비자들의 입장에서 크게 느껴지고 결국은 소비자들의 입장에서 소비에 더욱 민감해진다. 또한, $\alpha(t)$ 값이 커졌을 경우(u(4)) 변동성이 크기 때문에 일부분에서는 기존의 경우(u(1))보다 더욱 높은 피크타임 수요가 일부 구간에서 나타날 수 있다. 이 결과는 가격 정책을 설계한다면, 설계 단계에서 그 주의를 요한다는 것을 시사한다. 예를 들어 정



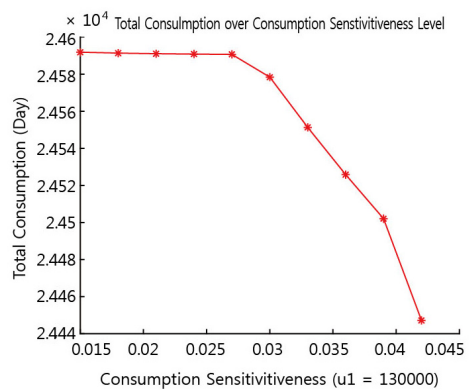
(a) 에너지소비



(b) 에너지가격



(c) 총에너지 소비량



(d) 유틸리티 변화에 따른 총에너지 소비량

[그림 10] 가격의 민감도($\alpha(t)$) 변화에 따른 결과

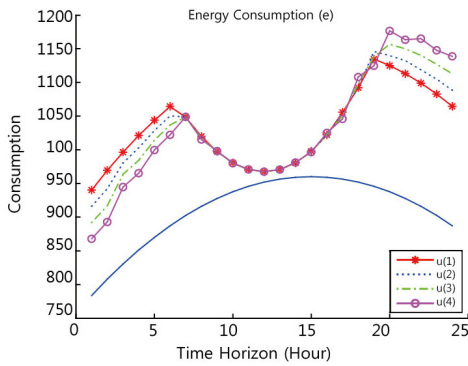
부가 에너지 소비에 민감한, $\alpha(t)$ 값이 높은 가격 정책을 수립한다면, 피크타임 수요가 순간 급증할 수 있고, 스마트 그리드 구축으로 얻고자 하는 피크타임 수요의 감소에 대한 편익이 감소할 수 있다.

또한, [그림 10(c)]에서 보는 바와 같이 특정 한계점(threshold, 점선)인 $\alpha(t) = 0.036$ 을 넘게 되면 그 소비량에 대한 패턴이 급격히 변화하면서 [그림 10(a)]와 [그림 10(b)]의 $u(4)$ 에 해당하는 그래프처럼 변동성이 급격히 증가함을 알 수 있다. 그리고, [그림 11(c)]에서는 총에너지 소비량이 $\alpha(t) \in [0.015, 0.045]$ 에 대해 전체적으로 0.2%로 미미하지만 증가하는 추세를 알 수 있다. 이는 급격한 수요변화로 인한 증가분으로 판단된다. 그러나, [그림 10(d)]에서

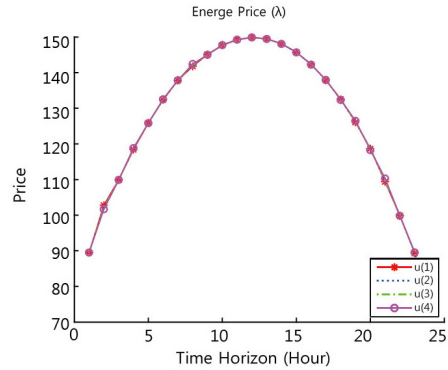
와 같이 소비자들의 효용성을 변화시켜 보았을 때 ($u_1 = 145000$ 에서 $u_1 = 130000$ 으로 낮춤), $\alpha(t)$ 가 커짐에도 전체 소비량이 감소하였다. 즉, 소비자가 효용과 비용 중 비용에 가중치를 더 두는 경우는 전체 소비량이 감소하고, 반대의 경우 전체 소비가 증가한다.

4.4 전력가격에 대한 소비자들의 전력소비의 민감도($\alpha(t)$)에 따른 분석

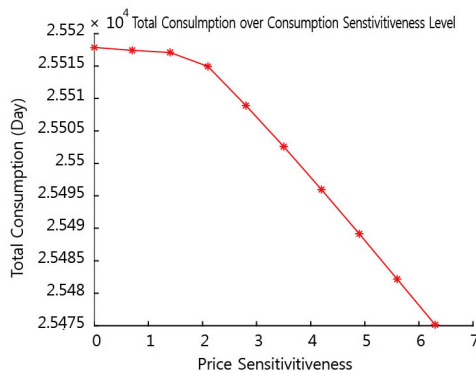
이 절에서는 전력소비자들의 전기 가격의 범위에 따른 심리적 최대 소비허용치의 변화에 대한 실험을 한다. $e(t) \leq e^{max}(t) = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$



(a) 에너지 소비



(b) 에너지 가격



(c) 총에너지 소모량

[그림 11] 전력소비의 민감도 변화에 따른 결과

에서 표현되는 것과 같이 전력 소비자들은 사용할 수 있는 심리적 최대 소비허용치($e^{max}(t)$) 이내에서 자신의 전력 소비($e(t)$)를 결정한다. 여기서, 기존의 연구들은 대부분 이 최대 소비허용치 값을 상수로 가정하였다[19, 29]. 그러나, 제 3.4절에서 언급된 바와 같이 소비자들은 가격의 변화에 따라 새로운 최대 허용치를 가변적으로 갖는다. 전기 가격이 올라감에 따라 소비자들이 심리적으로 최대 사용할 수 있는 범위가 커지게 되거나 그 반대의 현상이 나타날 수 있는데, 본 연구에서는 이를 모형에 포함 하였다. 심리적인 최대 소비허용치는 소비자들의 전기 가격변화($\lambda(t) - \lambda(t-1)$)에 대한 민감도는 $\delta(t)$ 로 표현될 수 있다. 다시 말해, 시간이 $t-1$ 에서 t 로 변했을 때 전기 가격이 오른다면($\lambda(t) > \lambda(t-1)$) 전기를 사용할 수 있는 최대 소비허용치는 기존에 심리적으로 가지고 있던 허용치($\gamma(t)$)보다 어느 정도($\delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$) 낮아질 것이다. 여기서 $\delta(t)$ 가 가격에 대해 낮아지는 정도를 의미한다. 그래서, 이 전력소비 민감도 상수 $\delta(t)$ 가 어떻게 변화하는지에 따라 실험을 실시하였다. 그래서, $\delta(t)$ 값을 0에서 6.3의 값으로 임의로 변화시켜가며 실험을 진행하였다. [그림 11]에서 첫 번째 그래프(a)는 시간에 따른 에너지의 소비가 어떻게 이루어지는가에 대한 결과 그래프이고, 두 번째 그래프(b)의 경우 시간에 따라 에너지 가격이 어떻게 변화하는지에 대한 그림이다. 세 번째 그래프(c)는 소비 민감도($\delta(t)$)가 커짐에 따라 하루 총 에너지 소비량이 어떻게 변하는지에 대한 결과이다. [그림 11(a), (b)]에서 그래프는 $u(1)$, $u(2)$, $u(3)$, $u(4)$ 는 각각 $\delta(t) = 0.0, 2.1, 4.2, 6.3$ 일 때의 결과이다.

가격에 대해서 민감도가 높은 경우([그림 11(a)]의 $u(4)$)는 소비패턴에 있어서 다른 형태로 나타남을 알 수 있다. 상대적으로 덜 민감한 경우에 비해 초반에는 상대적으로 조심스러운 낮은 사용량을 보이다가 후반부에는 상대적으로 더 높아지는 소비패턴을 보여준다. 가격의 차이는 앞 절에서의 소비에 대한 가격의 민감도 결과와는 달리 상당히 미미한 것으로 나타났다. 또한, [그림 11(c)]의 그래프

에서 볼 수 있듯이 총 소비량은 감소하는 것으로 나타났다. 비록 급한 경사를 보이지만, y축의 총 사용량의 단위가 크기 때문에, 실제로는 총 0.2% 정도의 소비 감소의 효과가 존재한다.

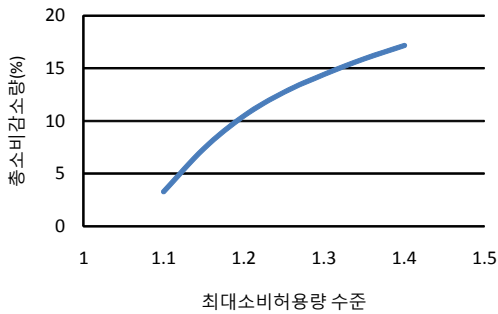
4.5 최대 소비허용량(e^{max})에 따른 분석

또한, 이 절에서는 소비자가 최대 사용할 수 있는 전력의 소비량(e^{max})의 변화에 따라 수요반응 실시간 가격정책의 효과에 대해서도 분석하여 보았다. 이 부분은 소비자들의 효용성과 직결된 문제이기 때문에 4.2.절의 예제를 기반으로 효용성 변화할 때를 기준으로 분석하였다. 제 4.2절의 예제에서는 소비 변동량은 u_1 이 120000에서 174000으로 변화하였을 때, 총 10.47%까지 증가하였다. 이에 대해 최대 소비허용량을 최소 소비량 대비 1.1배에서 1.4배까지 변화시키면서 실험을 하였다. <표 3>과 [그림 12]에서 나타난 것처럼 로그함수의 형태로 총 소비가 줄어드는 현상이 나타나는 것을 알 수 있다. 최대 소비허용량과 최소 소비량의 차이가 작은 경우, 예를 들면, 10%의 차이만 날 경우는 총 소비절감은 대략 3.28% 정도이고, 40%의 차이가 날 경우 약 17.15% 정도까지 전력소모를 줄이는 효과를 얻을 수 있다. 즉, 전력 소비자들의 최대 최소 소비량의 차이가 클수록 총 소비량을 줄일 수 있는 효과가 커진다. 실시간 가격 정책을 도입하였을 때, 소비자들의 최대 최소 소비량의 차이가 작을 경우는 스마트 그리드 도입 효과가 상대적으로 미미할 수 있음을 시사한다.

<표 3> 최대 소비허용량(e^{max})의 정도 변화에 따른 분석²⁾

최대 소비허용량 (γ/e^{min} 기준)	1.1	1.15	1.2	1.25	1.3	1.35	1.4
총 소비감소량 (%)	3.28	7.36	10.47	12.72	14.41	15.89	17.15

2) $e^{max}(t) = \gamma(t) - \delta(t)(\lambda(t) - \lambda(t-1))$ 에서 $\gamma(t)$ 를 e^{min} 의 배수로 산정하여, 최대 소비허용량의 정도를 γ/e^{min} 으로 산정하여 비교하였음.



[그림 12] 최대 소비허용량(e^{max}) 수준변화에 따른 총 소비 변동률

4.6 기존 모형과 제안된 모형의 비교 분석

Conejo et al.[19]와 Ferreira et al.[21]과 같은 기존 모형의 경우는 가격 및 소비 민감도를 고려하지 않은 모형으로 대변될 수 있다. 이에 대해, 제안된 모형과 기존 모형에 의한 결과의 차이를 이 절에서 비교하고자 한다. 우선, 기존 모형을 표현하기 위해, 조건을 $\alpha=0, \delta=0$ 로 고정하고 제 4.2절에서와 유사하게 10가지의 효용수준을 대상으로 실험을 실시하였다. 이 결과를 세 가지의 시나리오 가격 및 소비 민감도가 작은 시나리오 S1($\alpha=0.015, \delta=0.7$), 중간 정도의 시나리오 S2($\alpha=0.03, \delta=3.0$), 최대 값으로 구성이 된 S3($\alpha=0.045, \delta=6.3$)에 대해 아래에서 정의된 APE(Absolute Percentage Error), MAPE(mean absolute percentage error)을 기준으로 비교하였다.

$$APE_i = \frac{|TC_{\text{시나리오},i} - TC_{\text{기준},i}|}{TC_{\text{기준},i}} \times 100, \quad i = 1, 2, \dots, 10$$

$$MAPE_{\text{시나리오}} = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} \frac{|TC_{\text{시나리오},i} - TC_{\text{기준},i}|}{TC_{\text{기준},i}} \times 100, \quad i = 1, 2, \dots, 10$$

비교 결과는 아래 <표 4>에서와 같이 일반적으로는 1% 미만의 차이를 보였고, 각각의 시나리오 별로 평균적으로는 0.16%, 0.7%, 5.5%의 차이를 보였다. 그러나, 30여 번의 실험 중 12개의 경우 1% 이상의 차이가 발생하였으며, 최대 기준의 모형과 7.45%까지 차이가 나는 경우가 발생하였다. 가격 민감도 및 소비 민감도가 높을 경우 제안된 모형으로 오차를 크게 감소시킬 수 있음을 시사한다.

5. 결론 및 향후 연구

본 연구에서는 스마트 그리드가 구축이 될 때 적용될 실시간 가격 정책에 대한 새로운 모델을 제시하였다. 기존의 연구와 다르게, 본 연구에서는 소비자의 행동과 가격이 내외부 환경에 의해 결정이 되는 프로세스를 고려하였다. 가격에 따라 소비자들이 생각할 수 있는 전기 사용량의 한계 범위가 기존의 논문에서는 고정이 되었다면, 제안된 모형에서는 가격에 따라 그 상한이 바뀔 수 있음을 고려하였다. 또한, 가격 결정에 있어서 기존의 모형들은 수요에 따라 가격이 변하는 성격을 반영하는 것과 외부환경에 의해 결정되는 것의 두 가지 중 하나의

<표 4> 기존 모형과 제안된 모형과의 차이 분석

Utility level (u_1)	120000	126000	132000	138000	144000	150000	156000	162000	168000	174000	MAPE (%)
기존 모형	25053.8	25480.8	25918.8	26423.0	27041.3	27734.3	28394.7	28989.1	29539.8	30039.7	n/a
S1	24890.7	25359.6	25855.7	26420.0	27058.6	27741.5	28408.5	28995.5	29552.3	30044.1	n/a
APE(%)	0.65	0.48	0.24	0.01	0.06	0.03	0.05	0.02	0.04	0.01	0.16
S2	24847.9	25270.8	25643.7	26122.4	26757.5	27502.1	28198.0	28884.9	29485.0	30023.7	n/a
APE(%)	0.82	0.82	1.06	1.14	1.05	0.84	0.69	0.36	0.19	0.05	0.70
S3	26618.3	26844.5	27301.2	27866.0	28408.7	29249.5	30510.3	30514.2	30514.6	30519.5	n/a
APE(%)	6.24	5.35	5.33	5.46	5.06	5.46	7.45	5.26	3.30	1.60	5.05

모형을 고려하였으나, 본 논문에서는 두 가지를 동시에 고려한 모형을 제시하였다. 전기 소모에 따라 가격이 변할 것이고, 동시에 날씨나 산업의 일과시간 등의 외부 환경에 영향을 받기 때문이다.

이렇게 제시된 모형을 통해 다양한 시사점들을 이끌어내었다. 주요 시사점은 다음과 같이 요약될 수 있다. 첫 번째로 에너지 소비로부터 얻는 효용과 지불해야 하는 비용에 대한 트레이드오프를 고려하였을 때, 효용의 비중이 상대적으로 높은 경우 에너지 절감 효과가 상대적으로 클 수 있고, 다른 변수들에 의한 절감효과 비해 그 효과가 큰 편임을 시사한다. 이는 앞서 언급된 바와 같이 효용에 비중이 높은 가정 위주의 일부 지역과 비용에 비중이 높은 상업지구에서 스마트 그리드 수요반응이 실패하고 성공하는 차이를 설명할 수 있는 주요 인자로 인식될 수 있다. 두 번째로, 전기 가격이 소비에 민감하면 할수록 피크타임 수요를 올리고 변동성을 키우는 문제를 야기할 수 있다. 이로서 총 소비량을 증가시키는 효과가 나타나기도 한다. 또한, 소비에 대한 가격의 민감도의 영향이 가격에 대한 소비의 민감도보다 영향이 더욱 큰 것으로 나타났다. 즉, 소비자들은 가격에 그리 크게 반응하지 않으나, 상대적으로 소비의 변화가 전력 시장의 큰 변화를 일으킬 수 있음을 시사한다. 세 번째로, 전력 소비자들의 최대 허용 소비량과 최소 소비량의 차이가 클수록 총 소비량을 줄일 수 있는 효과가 커진다. 이는 실시간 가격 정책을 도입하였을 때, 소비자들이 최대 허용하는 범위가 작을 경우는 스마트 그리드 도입 효과가 상대적으로 미미할 수 있음을 시사한다.

추후 연구에서는 모형에서 사용된 주요 변수 값들이나 예측된 값들의 불확실성을 고려하여 최적해를 제시하는 모형, 예를 들면, robust optimization의 기법들을 활용한 모형으로 발전된다면 불확실성에 대비할 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 소비자의 행동을 적극 반영하는 연구도 기대할 수 있다. 예를 들면, 본 연구에서는 에너지 소비의 탄력성에 대해, 가격이 올랐을 때 소비를 줄이는 것과 가격

이 내렸을 때 소비를 늘리는 것을 같다고 가정하였으나 실제로는 다를 수 있다. 소비를 줄이기 위해 장비를 끄는 것은 상대적으로 쉽게 할 수 있으나 가격이 내렸다고 해서 소비를 위해 굳이 다시 켜려고 하지는 않을 것이기 때문이다. 이러한 소비자의 행동에 대한 연구는 수요반응에 보다 현실성을 부여할 수 있을 것으로 기대된다.

스마트 그리드의 특성을 반영한 모형이 개발된다면 더욱 이상적인 것이다. 예를 들면, 에너지 저장장치(ESS) 및 신재생 에너지에 따른 효과를 고려하여 일부 에너지가 생성이 되고 축적이 되는 스마트 그리드에서 발생할 수 있는 현상을 반영한 모형이 개발된다면 보다 현실적인 모델이 될 것이다. 김슬기 등[4]은 열병합 발전과 에너지 저장 시스템(ESS)을 복합적으로 사용할 시에 대략 13%에서 23% 정도의 에너지 절감 효과가 있는 것으로 분석되었고, 조경희 등[9]은 빌딩에 있어서, 수요반응을 적용하지 않고도 신재생 에너지를 활용하여 10%, ESS를 활용하여 11% 정도의 에너지 절감효과를 얻을 수 있는 것으로 보고되었다. 이러한 현상 및 특성들을 반영하여, 보다 정확한 수요반응 모형을 개발할 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 고종민, 송재주, 김영일, 정남준, 김상규, “스마트그리드 기반의 실시간요금제 및 DR 운영시스템 구현”, 『전기학회논문지』, 제59권, 제11호(2010), pp.1964-1970.
- [2] 김발호, “주택용 소비자에 대한 동적요금제도의 수요반응 영향 분석”, 2010 대한전기학회 제41회 하계학술대회(2010), pp.548-549.
- [3] 김성진, “스마트그리드 제주시실증단지, 구좌로는 테스트 한계”, 제주의 소리(2011), <http://www.jejusori.net/news/articleView.html?idxno=94611>.
- [4] 김슬기, 김종윤, 전진홍, 김웅상, “열병합발전 및 에너지저장 복합시스템 수용가의 에너지비용 절감효과 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집(2012),

- pp.131-133.
- [5] 김지희, 위영민, 주성관, 오재철, “스마트 그리드 (Smart Grid) 하에서 수요반응(Demand Response)의 역할 및 필요성”, 『전기의세계』, 제58권, 제12호(2009), pp.42-44.
- [6] 김향석, 신현정, “준지도 학습 및 신경망 알고리즘을 이용한 전기가격 예측”, 『대한산업공학회지』, 제39권, 제1호(2013), pp.30-45.
- [7] 신수진, 이세훈, 권윤중, 차재강, 문일철 “가상 전력 도매 시장의 최적 경매 가격 예측”, 『대한산업공학회지』, 제39권, 제6호(2013), pp.562-576.
- [8] 이유수, 김남일, 전용일, “전력산업에 대한 규제 개혁의 가격 및 생산성 효과에 관한 실증적 연구”, 『에너지경제연구원』, (2005), pp.1-111.
- [9] 조경희, 이효근, 김슬기, 김응상, “건물수용가의 BESS 용량에 따른 전기사용요금 절감률 분석”, 대한전기학회 학술대회 논문집, (2012), pp.126-128.
- [10] 조은호, “LS산전/10년 앞선 스마트그리드 기술력 자랑”, 파이낸셜뉴스(2011), http://www.fnnews.com/view?ra=Sent0601m_View&corp=fnnews&arcid=0922477669&cDateYear=2011&cDateMonth=11&cDateDay=28.
- [11] 지식경제부, “국가전력 소비지도”, 지식경제부 (2013), www.mke.go.kr.
- [12] 지식경제부, “스마트 그리드 국가 로드맵”, 지식경제부(2010), www.mke.go.kr.
- [13] 최태섭, 고경록, 박성찬, 김형태, 윤용태, “스마트 그리드 환경에서의 수용가 에너지 비용 최적화 전략 연구”, 대한전기학회 학술대회 논문집, (2012), pp.517-518.
- [14] KPX 수요예측팀, “장단기 부하패턴 변화 분석”, KPX(2008).
- [15] Albadi, M.H. and E.F.El-Saadany, “A summary of demand response in electricity markets,” *Electric Power Systems Research*, Vol.78, No.11(2008), pp.1989-1996.
- [16] Bu, S., F.R. Yu, and P.X. Liu, “A game-theoretical decision-making scheme for electricity retailers in the smart grid with demand-side management,” *IEEE*, (2011), pp.387-391.
- [17] Chiang, W.K., D. Chhajed, and J.D. Hess, “Direct Marketing, Indirect Profits : A Strategic Analysis of Dual-Channel Supply-Chain Design,” *Management Science*, Vol.49, No.1 (2003), pp.1-20.
- [18] Choi, J.Y., S.H. Rim, and J.K. Park, “Optimal real time pricing of real and reactive powers,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol.13, No.4(1998), pp.1226-1231.
- [19] Conejo, A.J., J.M. Morales, and L. Baringo, “Real-time demand response model,” *Smart Grid, IEEE Transactions on*, Vol.1, No.3(2010), pp.236-242.
- [20] Faria, P. and Z. Vale, “Demand response in electrical energy supply : An optimal real time pricing approach,” *Energy*, Vol.36, No.8 (2011), pp.5374-5384.
- [21] Ferreira, R., L. Barroso, M. Carvalho, R. Kelman, P. Lino, and P. Valenzuela, “The role of correlated prices in demand response : A robust optimization approach,” *IEEE*, (2011), pp.1-7.
- [22] Hao, S. and A. Papalexopoulos, “Reactive power pricing and management,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol.12, No.1(1997), pp.95-104.
- [23] Mohsenian-Rad, A.H. and A. Leon-Garcia. “Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments,” *IEEE Transactions on Smart Grid*, Vol.1, No.2(2010), pp.120-133.
- [24] Mohsenian-Rad, A.H., V.W.S. Wong, J. Jatskevich, and R. Schober, “Optimal and autonomous incentive-based energy con-

- sumption scheduling algorithm for smart grid," *IEEE*, (2010), pp.1-6.
- [25] Momoh, J.A., "Smart grid design for efficient and flexible power networks operation and control," *IEEE*, (2009), pp.1-8.
- [26] Moon, Y., T. Yao, and T.L. Friesz, "Dynamic Pricing and Inventory Policies : A Strategic Analysis of Dual Channel Supply Chain Design," *Service Science*, Vol.2, No.3(2010), pp.196-215.
- [27] Moon, Y., T. Yao, and S. Park, "Price negotiation under uncertainty," *International Journal of Production Economics*, Vol.134, No.2(2011), pp.413-423.
- [28] Roozbehani, M., M. Dahleh, and S. Mitter, "Dynamic pricing and stabilization of supply and demand in modern electric power grids," *IEEE*, (2010), pp.543-548.
- [29] Samadi, P., A. Mohsenian-Rad, R. Schober, V.W.S. Wong, and J. Jatskevich, "Optimal real-time pricing algorithm based on utility maximization for smart grid," *IEEE*, (2010), pp.415-420.
- [30] Torriti, J., M.G. Hassan, and M. Leach, "Demand response experience in Europe : Policies, programmes and implementation," *Energy*, Vol.35, No.4(2010), pp.1575-1583.
- [31] Weare, C., "The California electricity crisis : causes and policy options," *Public Policy Instit. of CA*(2003).