

# 소비자 효용을 고려한 실시간 요금제의 Load Serving Entity 수익 설계 방안

논 문
60-2-6

## Evaluation of a Load Serving Entity Revenue in the Real Time Pricing Considering Customer's Utility

노준우\* · 김문겸<sup>†</sup> · 김도한<sup>\*\*</sup> · 유태현<sup>\*\*\*</sup> · 박종근<sup>§</sup>  
(Jun-Woo Noh · Mun-Kyeom Kim · Do-Han Kim · Tae-Hyun Yoo · Jong-Keun Park)

**Abstract** - Real Time Pricing(RTP) is used not only to stabilize the price volatility in electricity market, but to hedge the price risk for Load Serving Entity(LSE). This paper presents an efficient method to reduce the risk of the price volatility in real-time electricity market. For designing the RTP, load patterns of customer are calculated by applying the demand elasticity and customer's utility is also analyzed to compute the RTP revenue through the risk-attribute of the LSE. In the end, the distribution of the LSE's profits can be evaluated to lead the optimal RTP value, depending on the level of customer's participation. Results from the case study based on PJM data are reported to illustrate the proposed method.

**Key Words** : Expected utility theory, Load serving entity, Real-time pricing, Risk-hedging

### 1. 서 론

오늘날 세계 각국의 전력산업은 수직 통합적인 구조에서 벗어나 수평적이며 경쟁적인 구조로 변화하고 있는 추세이다. 과거의 전력산업은 공공재적 성격이 강했기 때문에 국가가 주도하여 전력망을 구축하고, 발전시설을 건설하여 전력을 공급하였다. 그러나 이 과정에서 나타난 구조적인 불합리성과 발전 가격의 인위적인 조정으로 인한 문제점이 단일 전력회사의 시장지배력 행사와 같은 현상으로 드러났다. 따라서 이와 같은 구조적 모순을 해결하고자 경쟁적인 전력시장을 만들기 위한 수많은 연구가 행해졌으며[1-3], 그 결과 현재 미국의 PJM이나 유럽의 Nord Pool과 같은 성공적인 전력시장 구축을 이룰 수 있었다.

실시간 시장은 전력공급 한 시간 전에 열리는 시장으로 LSE(Load Serving Entity)가 소비자의 전력 수요를 맞추기 위해 전력을 거래하는 시장이다. 소비자의 전력 수요는 기온이나 송전 혼잡, 사고 등의 예측하기 매우 힘든 요소들로 구성되어 있기 때문에 LSE의 잘못된 수요 예측은 실시간 시장의 수요를 증가시켜 한계가격을 높이는 결과를 초래한다. 다시 말해서, LSE가 전력 공급 한 시간 전까지 충분한 전력의 양을 확보하지 않는다면, 전력수요에 비해 공급이 부

족하게 되므로 발전 가격이 높은 발전기가 낙찰을 받게 되고, 따라서 실시간 시장의 가격이 상승하는 결과를 초래한다. 결국 실시간 시장의 가격의 변동성은 이와 같은 이유로 생기게 되며, 이것은 실시간 시장에서 전력을 확보하는 LSE의 입장에서 위험 요소로 작용한다.

실시간 요금제(Real-Time Pricing)는 전력시장의 가격을 참조하여 실시간으로 변화하는 전력요금으로 LSE가 전력시장의 가격 변동성에 따른 위험 부담을 줄이기 위한 대안이다. 또한 RTP는 소비자들에게 이익을 가져다 줄 수 있으며, 장기적으로는 전력 시장가격 변동성을 경감시킬 수 있는 이점을 가지고 있다[4]. 그러나 LSE가 가격 변동성에 따른 위험을 RTP를 통해 소비자에게 전가하기 때문에 RTP는 실제로 선택적 요금제로 제공되고 있는 것이 현실이다[5-6]. 따라서 RTP 설계에 관련된 기존의 연구는 소비자가 RTP를 이용함으로써 인해 조정된 수요를 반영하여 사회적 비용을 최소화하는 방식으로 전개되거나[7], 최근에는 소비자가 RTP로 인하여 전가받는 변동성에 따른 위험을 일반요금제로 헷징하는 방안 등이 소개되었다[8].

본 논문은 기존의 연구가 소비자 측면에서 행해진 것에 착안하여 LSE 측면에서 최적의 RTP를 설계하는 내용을 담고 있다. RTP를 통하여 전력시장의 변동성에 따른 위험을 소비자와 LSE가 나누어 부담할 때, 소비자의 이익만을 분석하여 RTP를 설계하는 것은 LSE에게 예기치 않은 손실을 가져다 줄 수 있다. 또한 RTP에 참여하는 소비자의 수는 RTP를 어떻게 설계하느냐에 따라 상이할 수 있기 때문에 RTP 수준에 따른 소비자의 참여비율 또한 고려해야 할 문제이다. 이를 위해 본 논문은 실시간 시장의 전력가격에 LSE의 서비스 요금을 더하는 방법을 사용하여 실시간 요금제의 수준에 따른 소비자의 참여도를 분석하고, 이에 따른 LSE의 전력 판매 이익의 분포를 계산하여 실시간 요금제에 참여하는 소비자가 많을수록 LSE의 위험 부담이 줄어들 수

\* 정 회 원 : 케이파워주식회사

<sup>†</sup> 교신저자, 정회원 : 서울대 BK21 정보 기술 사업단 박사 후 연구원

E-mail : mith33@snu.ac.kr

\*\* 정 회 원 : 서울대 전기공학과 박사과정

\*\*\* 정 회 원 : 서울대 전기공학과 석 박사 통합과정

§ 펠로우회원 : 서울대 전기공학과 교수

접수일자 : 2010년 8월 31일

최종완료 : 2010년 12월 30일

있음을 사례연구를 통해 보았다.

## 2. 실시간 요금제에 대한 소비자 반응

본 논문에서는 LSE가 두 가지 요금제를 소비자에게 제공하여, 이를 통해 소비자는 LSE에게 제공받은 두 가지 요금제를 비교하여 자신에게 적합한 요금제를 취사선택할 수 있다고 가정한다. 첫 번째 요금제는 시간과 상관없이 소비 전력량 당 일정한 요금을 매기는 일반 요금제이고, 이를 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_{n,d,i} = R_{normal} \quad (1)$$

여기서,  $P_{n,d,i}$ 은 일반 요금제의 요금 수준이며,  $R_{normal}$ 은 일반 요금제로 얻는 LSE의 수익이다.

실시간 요금제는 크게 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫째로 실시간 시장의 전력 가격에 LSE의 서비스 요금을 더하여 요금을 매기는 One-part RTP 방법이 있고, 둘째로 각 소비자마다 CBL(Customer Baseline Load)을 매겨 CBL과 실제 사용량의 차이만큼을 실시간 시장의 가격을 적용하고 나머지는 일반적인 고정 요금으로 전력 요금을 책정하는 Two-part RTP 방법이 있다 [9]. 일반적으로 Two-part RTP가 일반 요금제와 병행하는 까닭에 가격 시그널(price signal)이 One-part RTP보다 높지 않다는 단점이 있기 때문에 본 논문에서는 두 번째 요금제로써 매 시간마다 실시간 시장 가격에 일정한 서비스 요금을 더하여 책정하는 One-part RTP를 선택하여, 다음 식 (2)과 같이 정의했다.

$$\hat{P}_{r,d,i} = R + \hat{\lambda}_{d,i} \quad (2)$$

여기서,  $\hat{P}_{r,d,i}$ 은 d일 i시간의 실시간 요금제 요금 수준이며, R은 LSE의 서비스 요금으로 적용되는 LSE의 RTP 수익이다.  $\hat{\lambda}_{d,i}$ 는 d일, i시간에 결정된 실시간 시장 가격이다.  $\hat{\lambda}_{d,i}$ 는 PJM의 실시간 시장 가격의 데이터를 분석한 결과 그림 1과 같이 Log-normal 확률분포와 유사한 형태를 가짐을 알 수 있었기 때문에 식 (3)과 같은 Log-normal 확률분포로 정의하였다.

$$\hat{\lambda}_{d,i} \sim \text{LogN}(\mu, \sigma^2) \quad (3)$$

$$\text{pdf}: f_x(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}\right), x > 0$$

일반적으로 Log-normal 확률분포는 정규분포 확률밀도함수의 변수  $x$ 에 로그를 취한 것이다. Log-normal 확률분포의 특징은 확률분포가 0 이하의 값에서 생성되지 않는다는 것인데, 이것은 음수값을 취하지 않는 실시간 시장 가격 분포를 모델링하는데 유리하게 사용될 수 있다.

제안된 실시간 요금제를 디자인하는데 있어서, 우선적으로 고려할 사항은 소비자가 일반 요금제에서 실시간 요금제로 전환할 시 변하는 수요패턴을 분석해야 한다는 점이다. 일반 요금제는 매 시간마다 요금의 변화가 일어나지 않기

때문에 소비자의 수요패턴은 소비자 개개인이 가지고 있는 성향을 따른다. 그러나 요금의 변화가 매 시간마다 생기는 순간부터 요금의 변화에 따른 소비자 수요의 조정량이 생기게 된다. 두 번째로 고려할 사항은 소비자가 실시간 요금제의 변동성을 어떻게 인식하는가에 대한 분석이다. 이를 위해 본 논문에서는 수요탄력성[7]과 기대효용이론[10]을 이용하여 소비자 위험태도지수(Risk-attitude Index, RI)를 도입하고, 위험태도지수를 중심으로 투자안의 위험성에 대한 각 소비자 효용을 통해 RTP 선택 여부를 분석한다.

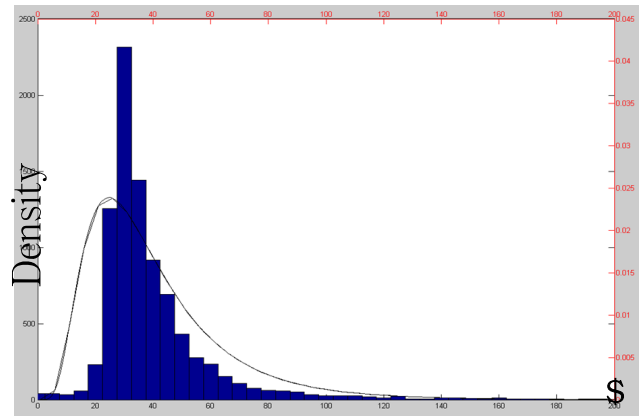


그림 1 실시간 시장 가격의 히스토그램과 Log-normal 확률 분포로 모델링된 그래프

Fig. 1 The price histogram and log-normal distribution model of the real time market

### 2.1 실시간 요금제가 소비자 수요패턴에 미치는 영향을 분석

매 시간 변화하는 실시간 요금제의 요금에 따른 소비자 수요 패턴의 변화를 알아보기 위해 수요탄력성 개념을 도입하였다. 실시간 요금제 하에서 수요탄력성  $\epsilon$ 는 식 (4)와 같다.

$$\epsilon = \frac{P_o}{D_o} \cdot \frac{\Delta D}{\Delta P} \quad (4)$$

여기서,  $P_o$ 와  $D_o$ 는 특정 지점의 가격과 수요를 나타내고,  $\Delta P$ 와  $\Delta D$ 는 가격과 수요의 변화량을 나타낸다. 가격 탄력성  $\epsilon$ 가 가지는 의미는 가격의 변화율에 따른 수요의 변화율을 정량적으로 정의할 수 있다는 점이다. 소비자 k 고유의 수요탄력성이  $\epsilon_k$ 로 주어질 때, 소비자 k의 수요를 다음 식 (5)과 같이 정의한다.

$$\hat{D}_{r,k,d,i} = D_{n,k,d,i} + \epsilon_k \frac{\bar{D}_{n,k,d}}{\bar{P}_{r,d}} (\hat{P}_{r,d,i} - \bar{P}_{r,d}) \quad (5)$$

여기서,  $\hat{D}_{r,k,d,i}$ 은 소비자 k가 실시간 요금제를 사용했을 때, 변화된 d일 i시간의 수요를 나타내며,  $D_{n,k,d,i}$ 은 소비자 k가 일반 요금제를 사용했을 때, d일 i시간의 수요를

뜻한다. 실시간 요금제가 소비자 k의 수요에 미치는 영향은  $\epsilon_k$ 에 의해 결정 된다.  $\bar{D}_{n,k,d}$ 은 소비자 k의 d일 평균 수요로 정의하였고,  $\bar{P}_{r,d}$ 은 실시간 요금제에서 제공한 d일 평균 가격으로 정의하였다.

**2.2 실시간 시장 가격의 변동성에 따른 위험평가**

본 논문에서는 소비자는 두 요금제를 취사선택하는 기준으로 24시간 동안 전력을 구매하는데 쓴 비용을 비교한다. 이때, 일반 요금제를 사용하고 있던 소비자 k가 실시간 요금제로 전환하였을 시 일반 요금제에 대한 이익 혹은 손해를 비율을 식 (6)과 같이 정의한다.

$$\hat{Y}_{k,d} = \frac{\sum_{i=1}^{24} P_{n,d,i} \cdot D_{n,k,d,i} - \sum_{i=1}^{24} \hat{P}_{r,d,i} \cdot \hat{D}_{r,k,d,i}}{\sum_{i=1}^{24} P_{n,d,i} \cdot D_{n,k,d,i}} \quad (6)$$

여기서,  $P_{n,d,i}$ 은 일반 요금제의 요금 수준을 나타내고,  $\hat{Y}_{k,d}$ 은 실시간 요금제로 전환 시 얻을 수 있는 손익율을 의미한다. 식 (6)에서, 분자는 24시간 동안의 일반 요금제를 사용하였을 때와 실시간 요금제를 사용하였을 때의 전력구매비용의 차이를 나타내고 있으므로, 이 식은 일반 요금제의 전력구매비용과 실시간 요금제의 전력구매비용의 차를 일반 요금제의 전력구매비용으로 나눈 것으로 정의할 수 있다.

또한, 기대효용이론을 적용하기 위해  $\hat{Y}_{k,d}$ 값을 효용함수로 구현한다. 여기서 사용하는 효용함수는 소비자가 RTP의 변동성에서 느끼는 위험을 측정하기 위한 것이다. 지수효용함수는 수익이 증가하더라도 절대위험회피 성분이 일정한 값을 취하기 때문에 순수한 변동성에 대한 효과만 측정하기 유리하다.[11] 따라서 본 논문에서는 지수효용함수를 사용했으며, 다음과 같은 식 (7)으로 정의된다.

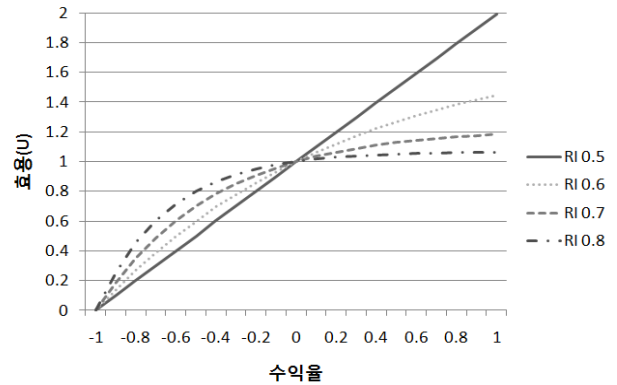
$$\hat{U}_{k,d} = a * [1 - e^{(-b * (\hat{Y}_{k,d} + 1))}] \quad (7)$$

여기서,  $\hat{U}_{k,d}$ 은 d일에 실시간 요금제를 사용했을 때, 소비자 k가 느끼는 효용이다.  $\hat{Y}_{k,d}$ 은 확률분포로 나타나기 때문에  $\hat{U}_{k,d}$  역시 확률분포를 가진다. 그리고 식 (7)에서 a와 b를 결정하는 방법으로 다음 식 (8)과 같이 3 조건을 부여했다.

$$U(0) = 1, U(-1) = 0, U(-0.5) = RI \quad (8)$$

여기서, RI는 위험태도지수(Risk-attitude Index)로써 식 (7)의  $\hat{U}_{k,d}$ 의 값이 0.5의 값에서 위험중립을 나타내고,  $\hat{U}_{k,d}$  값이 0.5보다 높아질수록 위험회피의 경향을 나타낸다. 그림 2는 RI값에 따른 효용함수를 보여준다. 여기서, 위험중립자의 경우 RI=0.5의 값을 가지며 수익과 손실에 대한 효용이 동일한 비율로 줄어들거나 증가하는 것을 볼 수 있다. 그러나 RI가 0.5 이상의 값을 가지는 위험회피자는 수익

에 대한 효용이 위험중립자보다 낮으며, 손실에 대한 효용은 위험중립자보다 크게 떨어지지 않는 것을 볼 수 있다.



**그림 2** 위험태도지수(RI)에 따른 지수효용함수  
**Fig. 2** The exponential utility function according to customer's risk index(RI)

따라서,  $\hat{U}_{k,d}$ 가 확률분포를 이루고 있기 때문에 d일 24시간 동안 소비자 k가 느끼는 기대효용은 다음과 같은 식 (9)로 계산할 수 있다.

$$\bar{U}_{k,d} = E[\hat{U}_{k,d}] \quad (9)$$

여기서,  $\bar{U}_{k,d}$ 의 의미는 하루 동안 소비자 k가 전력을 사용하는데 있어 실시간 요금제가 일반 요금제에 비해 어느 정도 손익이 나는지를 각 소비자 고유의 효용함수로 측정하여, 측정된 각 효용들의 확률분포를 기대값으로 산출한 것이다.

**3. 실시간 요금제 도입에 따른 LSE의 이익 분석**

지금부터 실시간 요금제와 일반 요금제의 효용을 비교하여 소비자의 요금제 선택을 분석한다. 먼저, 일반 요금제의 1년 동안의 평가된 효용은 하루의 효용을 1로 정의하였기 때문에 365로 나타낼 수 있고, 따라서 다음 식 (10)-(13)처럼 정리할 수 있다.

$$J_k = 1, \text{ if } \sum_{d=1}^{365} \bar{U}_{k,d} > 365 \quad (10)$$

$$J_k = 0, \text{ if } \sum_{d=1}^{365} \bar{U}_{k,d} \leq 365 \quad (11)$$

$$D_{r\_total,d} = \sum_{k=1}^{N_k} \sum_{i=1}^{24} \hat{D}_{r,k,d,i} \cdot J_k \quad (12)$$

$$D_{n\_total,d,i} = \sum_{k=1}^{N_k} D_{n,k,d,i} \cdot (1 - J_k) \quad (13)$$

여기서,  $J_k$ 는 소비자의 요금제 선택 변수이며, 실시간 요금제를 선택할 경우  $J_k$ 의 값은 1, 일반 요금제를 선택 시  $J_k$ 의 값은 0이다.  $D_{r\_total,d}$ 는 실시간 요금제를 선택한 소비자들

의 24시간 동안 전력소비량의 합이다.  $D_{n,total,d,i}$ 는 일반 요금제를 선택한 소비자들의 시간당 전력소비량의 합이다. 실시간 요금제의 전력소비량의 합을 시간당의 단위로 나타내지 않은 것은  $D_{r,total,d}$ 가 확률변수가 아니라는 것을 오해시키지 않기 위함이다. 그 이유는  $D_{r,k,d,i}$ 는 실시간 시장의 변동성에 의해 생성되는 확률변수이지만, 식 (6)과 같이 24시간 동안의 수요의 총합은 일반 요금제의 수요의 합과 같기 때문에 확률변수로 나타나지 않는다.

위와 같은 내용을 바탕으로 본 논문에서 LSE의 이익은 다음 식 (14)와 같이 정의할 수 있다.

$$\hat{B} = \sum_{d=1}^{365} [D_{r,total,d}R] + \sum_{d=1}^{365} \sum_{i=1}^{24} [(P_{n,d,i}D_{n,total,d,i}) - (\alpha\lambda_{da,d,i}D_{n,total,d,i} + (1-\alpha)\hat{\lambda}_{d,i}D_{n,total,d,i})] \quad (14)$$

여기서,  $\hat{B}$ 는 1년 동안 발생하는 LSE의 이익의 확률분포이다.  $\lambda_{da,d,i}$ 는 전일 시장의 시장 가격이고,  $\hat{\lambda}_{d,i}$ 는 실시간 시장의 시장가격이다.  $\alpha$ 는 LSE가 소비자에게 공급할 전력을 전일 시장과 실시간 시장에서 확보할 때, 두 시장에서 구매하는 전력량의 비율을 의미한다. PJM 연간 보고서에 따르면 전일 시장에서 거래되는 전력량과 실시간 시장에서 거래되는 전력량의 크기가 크게 차이가 나지 않기 때문에 본 논문에서는  $\alpha$ 값을 0.5로 사용한다.

LSE의 이익을 최적화하는 R값을 산정하기 위해 LSE가 가지는 위험에 대한 태도를 고려해야 한다. 이익의 변동성을 고려하지 않는다면 LSE의 이익은 단순히 기대수익의 극대화로 최적화 될 수 있다. 그러나 이익의 분산이 크다면 기대값 수준의 이익을 얻을 확률도 낮아지기 때문에 LSE는 자신이 원하는 위험에 대한 태도를 결정하고 최적화를 수행해야 한다. LSE의 이익을 최적화하기 위해 다음과 같은 최적화 과정을 거친다.

$$\max_R \mu(R) - \gamma\sigma(R) \quad (15)$$

$$\hat{B}(R) \sim N(\mu(R), \sigma(R)) \quad (16)$$

여기서,  $\gamma$ 는 LSE의 위험태도계수이다. 극단적인 경우로  $\gamma=0$  인 상태에서 최적화를 진행하면, LSE의 이익은 분산을 고려하지 않은 이익의 기대값이 최대가 되는 수치에서 최적화가 완료될 것이다. 이 경우는 LSE에게 극대화된 이익을 제공할 수 있으나 그만큼 확률적으로 이익이 낮은 값에서 결정될 수 있다는 위험을 감수해야 하는 것이다. 반대로  $\gamma$ 값이 매우 높은 경우를 생각한다면, LSE는 이익을 극대화하는 것 보다 높은 확률로 생기는 이익을 원하는 경우로 생각할 수 있다. 따라서  $\gamma$ 값을 LSE의 위험태도에 맞춘 적절한 수치를 넣어서 계산한다면 LSE가 원하는 이익을 산출하기 위한 최적화 과정을 수행할 수 있다.

또한, 제안한 방법이 효과적으로 리스크 헷징하는지를 기존의 실시간 요금제 설계 방법과 비교하기 위해 다음 식 (17)-(18)을 제시하였다.

$$R_{pre} = P_{n,d,i} - \bar{\lambda} \quad (17)$$

$$\hat{P}_{pre,d,i} = R_{pre} + \hat{\lambda}_{d,i} \quad (18)$$

여기서, 식 (17)의  $R_{pre}$ 는 기존 방법으로 실시간 요금제를 설계했을 때 적용되는 LSE의 수익이고,  $\bar{\lambda}$ 는 실시간 시장 가격의 평균을 의미한다. 식 (18)의  $\hat{P}_{pre,d,i}$ 은 기존의 방법으로 설계된 실시간 요금제의 d일 i시간대 요금 수준이다.

#### 4. 사례연구

사례연구는 소비자의 특성을 다음 표 1과 같이 3가지 유형으로 나눠서 각각에 대해 연구를 수행하였다.

표 1 사례연구에서 가정한 소비자군의 유형

Table 1 Attributes of customers assumed in the case study

	Case #1	Case #2	Case #3
수요 탄력성	-0.01, -0.03, -0.06, -0.10	-0.01, -0.03, -0.06, -0.10	-0.10, -0.13, -0.16, -0.20
위험태도 지수	0.6, 0.7, 0.8	0.7, 0.8, 0.9	0.6, 0.7, 0.8
소비자 수	전체 100명의 일반 요금제를 사용하는 소비자 중 실시간 요금제 참여를 고려하는 소비자 수는 36명		
소비자 부하패턴	높은 수준, 낮은 수준, 고저차가 심한 수준		
종합	대조군	위험회피적인 소비자군	수요탄력성이 높은 소비자군

Case #1은 비교를 위한 일반적인 상황을 가정한 것이다. 실제 소비자들의 정확한 위험태도지수나 부하패턴, 수요탄력성 등의 정보를 얻을 수 없었기 때문에, 극단적인 조건이 아닌 통상적인 조건을 가정하여 위 표의 Case #1과 같이 정했다. Case #2은 다수의 위험회피적인 소비자를 대상으로 모의 분석했다. 위험회피적인 소비자는 실시간 요금제의 변동성에 민감하게 반응하는 소비자 군으로 위험태도지수를 Case #1에서 한 단계 낮은 수준으로 가정하였다. Case #3은 수요탄력성이 높은 집단으로써 실시간 요금제에 대한 참여도와 관심이 높은 집단이다. 실제 실시간 요금제를 수행하고 있는 집단에 대한 수요탄력성을 산출한 논문들에서 조사한 것에 따르면, 일반적인 대수용가 및 산업용 부하를 가지는 소비자들은 평균적으로 -0.15 정도의 수요탄력성을 보인다[12]. 그러나 조사한 집단의 수요탄력성의 분포가 정규분포에서 많이 벗어난 분포였고 수요탄력성이 0으로 측정된 집단도 전체의 1/3이나 차지하였다. 따라서 수요탄력성을 낮은 집단, 높은 집단으로 나누어서 사례연구를 진행하였다.

##### 4.1 RTP 수익에 따른 각 사례별 LSE 이익 분포

LSE의 RTP 수익 R 값에 따른 전력회사의 이익 분포는

그림 3, 그림 4, 그리고 그림 5와 같이 정규분포로 나타났다. 본 연구를 통해 R값을 낮게 책정할수록 실시간 요금제에 참여하는 소비자 수는 증가하였고, 실시간 요금제에 참여하는 소비자가 많을수록 이익의 분산이 줄어들고 있는 것을 확인할 수 있었다. 또한 실시간 요금제의 소비자의 수가 늘어남에 따라 LSE의 기대수익이 줄어드는 경향을 보였다.

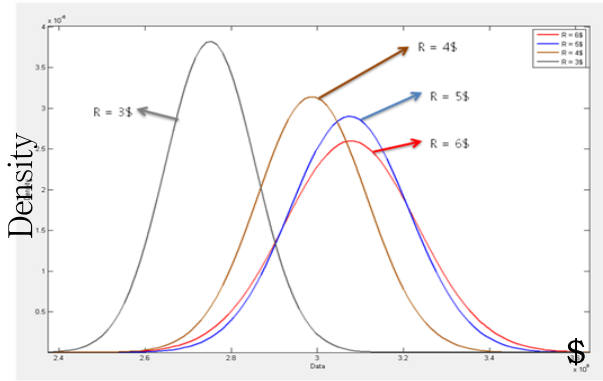


그림 3 Case #1: 대조군을 대상으로 한 LSE 이익분포의 변화  
Fig. 3 Transition of LSE benefit distribution in case #1

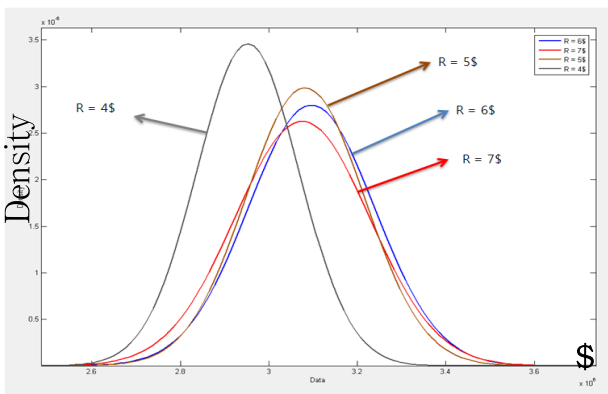


그림 4 Case #2: 위험회피군을 대상으로 한 LSE 이익분포의 변화  
Fig. 4 Transition of LSE benefit distribution in case #2

그림 3의 Case #1에서는 R값이 6\$에서 5\$로 변하는 과정에서 LSE의 기대수익이 다소 늘어나는 결과를 보였지만 그 증가량은 크게 늘어나지 않았다. 대략적으로 5~6\$ 수준에서 LSE의 기대수익과 분산이 최적화되는 것이 관찰되었으며, R값이 줄어들수록 수익의 분산은 낮아지지만 수익의 분포가 전체적으로 낮아져서 최적점에서 벗어나는 결과를 보였다.

그림 4의 Case #2에서 가정된 위험회피적인 성향의 소비자군은 실시간 요금제에 참여하려는 소비자가 Case #1보다 1\$ 낮은 수준에서 처음으로 나타났다. 이것은 실시간 요금제의 수준이 더 낮을 때 참여하려는 소비자들의 위험회피적

인 성향을 잘 보여주는 결과이다.

그림 5에서 나타난 Case #3는 수요탄력성이 높은 소비자 집단으로 Case #1의 수요탄력성보다 -0.1 더해진 소비자 집단이다. 최초로 실시간 요금제에 참여하겠다는 의지를 보인 소비자는 R값이 9\$일 때 처음 나타났다. 이것은 소비자가 실시간 요금제에 참여하더라도 낮은 요금에서 부하를 늘리고 높은 요금에서 부하를 줄이는 식의 수요반응을 탄력적으로 하여, 결국 전력을 사용하는데 드는 비용을 크게 절감하였기 때문이다.

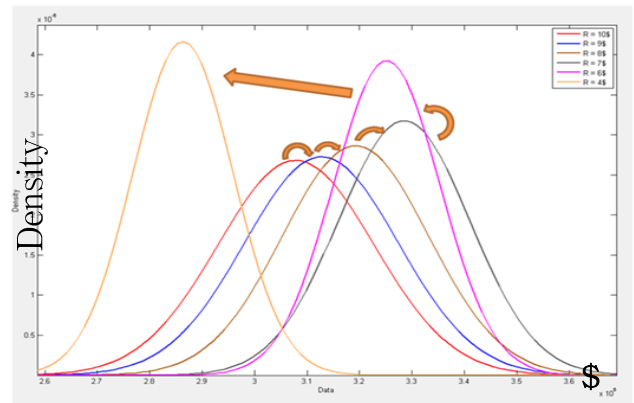


그림 5 Case #3: 수요탄력성이 높은 집단을 대상으로 한 LSE 이익분포의 변화  
Fig. 5 Transition of LSE benefit distribution in case #3

이전의 사례들과 눈에 띄게 차이가 나는 것은 R값이 줄어들더라도 LSE의 기대수익이 어느 시점까지는 늘어나고 있다는 것이다. 앞서 실행한 Case #1, Case #2와 달리 R값의 수준이 10\$에서 7\$까지 낮아질수록 LSE의 기대수익이 증가했다. 이것은 실시간 요금제에서 얻는 수익이 일반 요금제에서 얻는 수익을 초과한 결과이다. 또한 기대수익이 증가하는 효과와 함께 수익의 분산 역시 감소하는 결과를 보였다. 최적화된 위치는 R값이 6~7\$ 사이에서 발견되었으며, 그 이후에는 기대수익은 급격하게 떨어지는 결과를 보였다.

#### 4.2 각 사례별 LSE의 이익을 최적화 하는 RTP 수익 결정

전력회사의 위험태도에 따른 최적의 RTP 수익을 위해 식 (15)을 이용해 산출한 결과 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 그림 6의 가로축의 LSE 위험태도는 수익의 확률분포 상에서 최소 x %이상의 확률로 나타나는 수익으로 최적화를 진행하였다는 것을 뜻한다. 앞 절에서 설명한 바와 같이 위험회피적인 소비자군의 R값이 가장 낮은 수치로 나타났고, 수요탄력성이 높은 소비자군에서 R이 가장 높은 수치로 나타났다. 또한 LSE의 위험태도가 50~90%까지는 R값이 하락폭이 일정하였지만 그 이후부터는 급격하게 떨어짐을 볼 수 있었다.

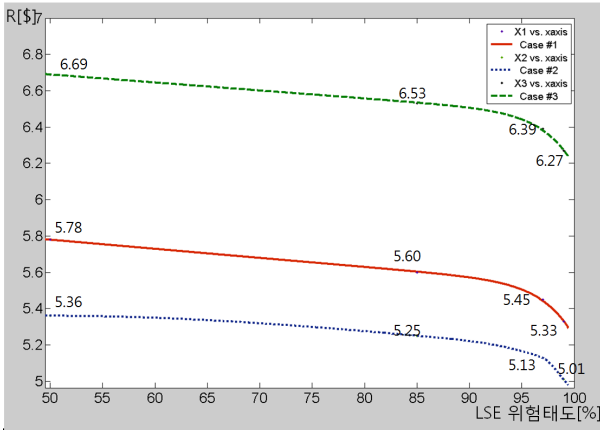


그림 6 각 사례별로 정리한 LSE의 이익을 최대화하는 RTP 수익 R 결정

Fig. 6 Revenue factor that maximizes LSE benefit in three cases

4.3 실시간 요금제의 리스크 헷징 효과 비교분석

본 논문에서는 제안된 실시간 요금제 방법이 효과적으로 리스크 헷징하는지를 기존의 실시간 요금제 설계 방법과 비교분석 하였다. 여기서 식 (17)의  $\bar{\lambda}$ 을 PJM의 자료에 근거하여 측정된 결과 55.5 \$로 측정되었고,  $P_{n,d,i}$ 은 60 \$로 가정했기 때문에 식 (18)의  $R_{pre}$ 는 4.5 \$로 계산을 수행하였다.

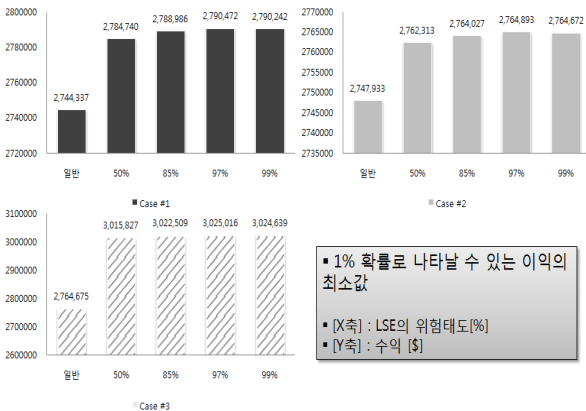


그림 7 LSE의 최소 이익을 일반적인 실시간 요금제 산정 방법과 제안한 방법으로 비교

Fig. 7 Comparison between the conventional method and the proposed method for LSE benefit

그림 7에서 1% 확률로 일어날 수 있는 최소 이익을 기존의 방법과 제안한 방법을 사용하여 산출하였다. 여기서 1% 확률로 일어날 수 있는 최소 이익이란 LSE의 이익 정규분포에서 1% 확률을 가지는 이익 중 가장 낮은 값을 뜻한다. 그림에서 보는 바와 같이 제안한 방법에서 얻을 수 있는 리스크 헷징 효과가 기존의 방법에 비해서 높게 나타남을 알

수 있다. 또한 소비자군이 위험 중립자, 수요탄력성이 높을 수록 제한한 방법에 의한 리스크 헷징 효과가 크게 나타남을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문은 실시간 요금제의 RTP 수익을 산정하기 위해 기대효용이론을 이용하여 실시간 요금제에 대한 소비자의 효용을 분석하였다. 실시간 요금제를 사용함에 따라 소비자는 자신의 부하를 매 시간 실시간 요금에 따라 현명하게 조정한다는 가정 하에, 각 소비자의 위험태도지수(RI)에 따른 효용을 산출하여 효용이 높은 요금제를 선택하는 방법으로 요금 수준에 따라 변하는 RTP 소비자 비율을 계산하였다. 또한 LSE의 이익 분포를 계산하여 기대수익과 분산의 최적화를 진행하는 방법론을 제시하였다. 본 논문의 사례연구 결과 기존의 방법보다 더 높은 수준의 R값에서 LSE의 이익을 최적화할 수 있었으며, 실시간 시장 가격의 변동성에서 오는 리스크도 줄일 수 있었다. 전력 계통에서 기대 하는 실시간 요금제의 효과는 첨두부하의 감소로 인해 계통의 신뢰도를 높이고, 전력시장의 변동성에 기인한 위험을 감소시켜, 낮은 가격에 더 많은 전력을 사용하여 생산성을 향상시키는 것이다. 따라서 본 연구를 통해 RTP에 참여하는 소비자의 수는 LSE가 설계한 RTP에 따라 변화하며 그에 따른 LSE의 기대수익과 수익의 변동성에도 영향을 줄 수 있음을 확인했고, 이러한 상관관계를 분석을 통해 LSE의 이익을 평가하여 최적의 RTP를 설계하는 할 수 있음을 입증하였다.

국내 전력시장은 현재 CBP기반 시장이므로 본 논문을 현실점에서 적용하는데 있어 제약이 따를 수 있다. 그러나 향후 스마트그리드가 구현되고 전력요금이 자유화 체제로 변한다면, 국내 RTP를 도입하는데 있어 본 논문이 제안한 방법이 적절한 수준의 RTP를 제공하여 소비자의 참여를 유도하는데 기여를 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] A. L. Ott, "Experience with PJM Market Operation, System Design, and Implementation", IEEE Transactions on Power Systems, 18(2), pp.528-534, 2003.
- [2] R. Walawalkar, S. Blumsack, J. Apt and S. Fernands, "Analyzing PJM's Economic Demand Response Program", IEEE Power Engineering Society General Meeting. 2008.
- [3] N. K. Nomikos, and O. A. Soldatos, "Modelling short and long-term risks in power markets: Empirical evidence from Nord Pool", Energy Policy 38(10), pp.5671-5683, 2010.
- [4] S. Borenstein, "The Long-Run Effects of Real-Time Electricity Pricing", Energy Journal 26, pp.93-116, 2005.
- [5] Benefits of Demand Response in Electricity Markets



and Recommendations for Achieving Them: A Report to the United State Congress Pursuant to Section 1252 of the Energy Policy Act of 2005, U.S. Department of Energy, Feb. 2006. [Online]. Available: [http://www.oe.energy.gov/Documents\\_andMedia/congress\\_1252d.pdf](http://www.oe.energy.gov/Documents_andMedia/congress_1252d.pdf).

- [6] Assessment of Demand Response and Advanced Metering: Staff Report, Federal Energy Regulatory Commission, Aug. 2006. [Online]. Available: <http://www.ferc.gov/legal/staff-reports/demand-response.pdf>.
- [7] F. C. Schweppe, M. C. Caramanis, R. D. Tabor, and R. E. Bohn, "Spot Pricing of Electricity", Kluwer Academic Publisher, 1988.
- [8] Q. Zhang, and X. Wang, "Hedge Contract Characterization and Risk-Constrained Electricity Procurement", IEEE 24(3), pp.1547-1558, 2009.
- [9] M. T. O'Sheasy, "Is Real-Time Pricing a Panacea? If So, Why Isn't It More Widespread?", The Electricity Journal, 15(10), pp.24-34, 2002.
- [10] 박정식, 박종원, "현대투자론", 다산출판사, 2005.
- [11] R. A. Haugen, "Modern investment theory", Prentice Hall, 2001.
- [12] N. Hopper, C. Goldman, and B. Neenan, "Demand Response from Day-Ahead Hourly Pricing for Large Customers", The Electricity Journal 19(3), pp.52-63, 2006.

저 자 소 개



**노 준 우 (盧 俊 佑)**

1982년 5월 7일 생. 2008년 경북대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2010년 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사).

Tel : 010-3544-7192

E-mail : sodance@korea.com



**김 문 겸 (金 文 謙)**

1976년 9월 12일 생. 2004년 고려대학교 전기전자전파공학부 졸업. 2006년 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 2010년 동대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학박사). 2010년~현재 서울대학교 BK 21 정보기술 사업단 박사후 연구원.

Tel : 02-880-7258

Fax : 02-885-4958

E-mail : mith33@snu.ac.kr



**김 도 한 (金 道 漢)**

1981년 8월 13일 생. 2005년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2005년~현재 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 석·박사 통합과정.

Tel : 02-880-7258

Fax : 02-885-4958

E-mail : chaos81@snu.ac.kr



**유 태 현 (俞 泰 賢)**

1984년 10월 15일 생. 2007년 서울대학교 전기공학부 졸업. 2009년 서울대학교 대학원 전기·컴퓨터 공학부 졸업(공학석사). 2009년~현재 서울대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-880-7258,

Fax : 02-885-4958

E-mail : taehyun1015@hotmail.com



**박 종 근 (朴 鍾 根)**

1952년 10월 21일 생. 1973년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1979년 일본 동경대학교 공학계 대학원 졸업(공학석사). 1982년 동대학원 졸업(공학박사). 1983년~현재 서울대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-880-7247

Fax : 02-878-1452

E-mail : parkjk@snu.ac.kr