



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

博士學位論文

전력시장 수요반응 가격결정을 위한  
가격탄력도 기반 에너지 스케줄링 모형



濟州大學校 大學院

經營情報學科

金 鍾 勳

2015年 2月

전력시장 수요반응 가격결정을 위한  
가격탄력도 기반 에너지 스케줄링 모형  
Elasticity Energy Consumption Scheduling Model  
for Demand Response Pricing

指導教授 김 두 경

김 종 훈

이 論文을 經營情報學 博士學位 論文으로 提出함



김종훈의 經營情報學 博士學位 論文을 認准함

審査委員長 \_\_\_\_\_  
委 員 \_\_\_\_\_  
委 員 \_\_\_\_\_  
委 員 \_\_\_\_\_  
委 員 \_\_\_\_\_

濟州大學校 大學院

2014年 12月

# Elasticity Energy Consumption Scheduling Model for Demand Response Pricing

Jong Hoon Kim  
(Supervised by professor of MIS Doo Gyung Kim)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement  
for the degree of Doctor of Management Information  
Systems.

2014. 12.

This thesis has been examined and approved.



.....  
Thesis director, Doo Gyung Kim, Prof. of MIS  
.....  
.....  
.....

Dec. 2014

Department of Management Information Systems

GRADUATE SCHOOL

JEJU NATIONAL UNIVERSITY

## < 목 차 >

Abstract .....	1
제 1장. 서 론 .....	5
제 2장. 가격결정의 이론적 배경 .....	10
1. 시장 유형 .....	10
2. 가격결정 유형 .....	13
3. 가격반응 함수 .....	16
4. 가격탄력도 .....	19
5. 헤도닉 기법 .....	21
6. 전력가격 결정 .....	26
제 3장. 선행 연구 .....	37
1. 게임이론기반 스케줄링(GECS) .....	37
2. 신뢰도기반 스케줄링(TECS) .....	40
3. 평 가 .....	42
제 4장. EECS모형 .....	44
1. EECS 개요 .....	47
2. 개별 제시가격( $P_n^t$ ) 함수 .....	50
3. 기준가격( $P^t$ ) 함수 .....	55
제 5장. 분 석 .....	58
1. 시 나 리 오 .....	59
2. EECS 분석 .....	59
3. EECS-TECS 비교 .....	69
제 6장. 결 론 .....	74
참 고 문 헌 .....	76

# 그림 목 차

그림1-1 전력시장 구조 .....	6
그림1-2 연구의 구성 .....	8
그림2-1 완전경쟁시장의 가격결정 .....	11
그림2-2 독점시장의 가격결정 .....	11
그림2-3 과점시장의 가격결정 .....	11
그림2-4 손익분기점 .....	15
그림2-5 수요의 가격탄력성 .....	20
그림2-6 헤도닉기법을 통한 가치평가 .....	23
그림2-7 변동요금의 위험 및 보상 .....	29
그림2-8 전력원가 구조 .....	33
그림4-1 EECS 구조 .....	46
그림5-1 부하량 변화 및 제시가격 .....	60
그림5-2 시간변화에 따른 참여자 요구부하량 .....	62
그림5-3 t시간 전력피크 부하량 및 제시가격 분포 .....	64
그림5-4 t+1시간 개별 부하량 및 전력가격 .....	66
그림5-5 시간대 별 참여자 전력가격 .....	66
그림5-6 기준가격 조정 시 전력가격 .....	67
그림5-7 TECS모형의 개별 전력가격 및 평균가격 .....	70
그림5-8 EECS와 TECS 전력가격 분포 .....	71
그림5-9 개별 전력가격 비교 .....	71
그림5-10 총 부하량 비교 .....	72
그림5-11 PAR값 비교 .....	73
그림5-12 총 전력가격 비교 .....	73

# 표 목 차

표2-1 시장유형별 가격반응함수 .....	17
표2-2 수요반응 프로그램의 유형 .....	28
표2-3 현 전력가격 .....	34
표2-4 가정용 전력가격 .....	34
표3-1 기존 모형 장단점 분석 .....	43
표5-1 시뮬레이션 시나리오 .....	60
표5-2 소비전력에 따른 부하량 계산 .....	63
표5-3 부하량 증가 시 개별 제시가격 통계치 .....	64
표5-4 부하량 감소 시 개별 제시가격 통계치 .....	65



전력시장 수요반응 가격결정을 위한  
가격탄력도 기반 에너지 스케줄링 모형  
Elasticity Energy Consumption Scheduling Model  
for Demand Response Pricing

Abstract

In future power grid, the informations about the power supply and demand will be scattered instantly. This is the same as that applied to web2.0 on World wide web. Future power grid is flexible open platform that suppliers and buyers can switch their positions. Solar panels, wind turbines generate power around and about. So it can be called as 'Peer to peer energy' or 'Energy 2.0.'

The Demand Response(DR) pricing in traditional perfect competition market is meant to set the price to maximize provider's profit as a reaction to consumer's demands. By contrast, we aim to solving two problems - setting preemptive power demand coordination and appropriate level of pricing - in electricity market. Therefore it is important to determine the level of strategic price that can relieve the energy Peak and figure out the accurate demands. Energy Consumption Scheduling(ECS) is a mechanism of demand readjustment through pricing and involving a function of price.



This paper suggests Elasticity Energy Consumption Scheduling(EECS), a price function containing the price elasticity of consumer in energy market. EECS is efficient price calculation algorithm because it calculates based on consumers' attitude to price change as well as historic data of demands. EECS is a price function related to individual price elasticity and proposes different energy price to participants. Price elasticity means the variation in demands. As electricity price go too high to consumers' acceptable range, consumer will cancel the reservations through ECS system. So Energy Peak get down to average loads, make power grid stable. In addition, the simulation calculates the load and electricity price by comparing and analyzing the existing model TECS(Trust based Energy Consumption Scheduling). EECS was analyzed as excellent in PAR(Peak-to-Average Ratio) value which means a peak distribution of the power consumption. Compared with the value of Total Price, EECS's is cheap than TECS's. New pricing model based on Elasticity will contribute to the improvement of the sustainability of energy.

전통적 완전경쟁시장에서 수요반응가격이란 공급에 대한 수요를 파악하고, 그 반응으로 공급자 이익 극대화를 위한 가격설정을 의미한다. 이에 비해 전력시장의 수요반응 가격결정은 적절한 크기의 가격결정과 선제적 전력수요조절이라는 두 가지 관점을 지향한다. 따라서 수요반응 전력가격은 수요량을 정확하게 파악하는 문제와 수요를 조절할 수 있는 가격의 전략적 수준을 결정하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 전력수요량을 파악하고 수요 재조정 메커니즘으로 ‘에너지소비 스케줄링(ECS)’을, 전략적 가격결정에 대해 ‘탄력도기반 가격함수’를 제안한다.

전력가격의 결정은 정보기술을 활용하여 수요를 실시간으로 수집하고, 전략적 가격을 결정·제시하며 안정적이고 효율적인 전력망의 운영을 목적으로 한다. 이것은 시장전체의 효율 측면에서 공급자의 전력판매에 따른 수익보다 전력망 수요조절의 실패(Black out)가 미치는 손해가 더 크기 때문이다. 에너지시장은 기존 ‘공급-수요 구분이 명확한 단방향·정태적 시장’에서 ‘공급-수요 구분이 불분명한 쌍방향·동태적 시장’으로 진화하고 있다. 이러한 변화에 있어 가장 중요한 메커니즘이 공급-소비 가격결정에 관한 것이다. 미래 전력시장의 공급과 수요에 관한 실시간 정보를 활용한 실시간변동가격(RTP)제도를 통해 폭증하는 전력수요를 억제하여 전력수요 피크를 낮추고, 발전시설 건설에 따른 막대한 비용을 절감하는 합리적 소비를 실현한다. 즉, 전력사용이 급증하는 시간대에 평상시보다 높은 단위 전력량 당 단가를 책정하고 이를 사전에 사용자에게 실시간으로 고지함으로써 전력사용을 분산시켜 전력발전 및 송·배전 계통에 안정적인 운영을 유지할 수 있다.

본 연구에서는 수요반응 전력가격 결정에 참여자(소비자) 가격탄력도를 포함하는 가격함수를 제시하고, 기존 연구 결과와 비교분석함으로써 가격산출 알고리즘의 효율성을 검증하였다. 가격변화량 대비 수요변화량을 의미하는 가격탄력도는 과거의 자료를 기반으로 계산되므로 선 변동가격 제시-수요량 변화를 추구하는 전력시장의 특성을 반영하기 위해 헤도닉 기법을 적용하였다. 헤도닉 기법은 여러 속성으로부터 기댓값을 산출하는데 유용하다. 이 모형은 실시간 작업예약정보에

대해 기준가격과 개별 가격탄력도에 기초한 시간대 별/사용자 별 차별화된 가격을 제시함으로써, 전력소비 스케줄이 누적되도록 하여 차등적으로 단가를 적용함으로써 나중에 입력되는 작업에 보다 높은 가격을 제시하도록 하였다. 또한 시뮬레이션을 통해 가격함수에 의한 부하량과 제시가격을 산출하고, 기존 모형과 비교 분석한 결과, 전력피크 분산을 의미하는 PAR값과 총 전력가격에서 우수한 것으로 분석되었다. 전력가격에 대한 소비자의 반응을 반영하는 새로운 가격결정은 에너지시장의 지속가능성(Sustainability)<sup>1)</sup> 제고에 기여할 것이다.



---

1) Sustainable development is the organizing principle for sustaining finite resources necessary to provide for the needs of future generations of life on the planet(*Brundtland Report, from the United Nations World Commission on Environment and Development, 1987*).

## 제 1 장 서 론

전통적 전력계통은 발전에서 사용까지 단방향으로 전력네트워크를 따라 흐르는 구조인데 반하여, ICT의 발전에 따른 기술을 전력에 융합함으로써 전력생산과 소비가 쌍방향으로 또는 역방향으로 필요에 따라 자유롭게 전환되는 혁신적인 전력네트워크로 진화하고 있다. 정보기술을 통해 전력생산과 수요에 관한 정보가 실시간으로 공유되는 미래 전력네트워크는 참여와 공유로 대표되는 웹2.0을 전력망에 그대로 옮겨놓은 새로운 방식이라 표현할 수 있다. 또한 전력의 생산과 소비가 명확하게 분리된 기존과는 달리 태양광, 풍력 등 신재생에너지원이 곳곳에 혼재되어 있어 생산과 소비가 수시로 변할 수 있는 유연한 오픈 플랫폼(Open Platform)으로 전력망의 P2P 혹은 에너지2.0으로 정의될 수 있다.

이것은 ‘공급자와 수요자 구분이 명확한 단방향-정태적 시장’에서 ‘공급자와 수요자 구분이 모호한 쌍방향-동태적 시장’으로의 변화를 의미한다. 여러 변화요소 중 가장 중요한 메커니즘이 다수 공급-다수 소비의 가격결정에 관한 것이다. 수요반응 가격결정은 공급과 수요에 관한 실시간 정보를 활용한 실시간변동가격(RTP; Real Time Pricing)제도로, 폭증하는 전력수요를 억제하고, 발전시설 건설에 따른 막대한 비용을 절감하는 합리적 소비를 실현하는 핵심수단이다. 즉, 전력사용이 급증하는 시간대에 평상시보다 높은 단위 전력량 당 단가를 책정하고 이를 사전에 사용자(전력소비자)에게 실시간으로 고지하여 전력사용을 분산시킴으로써 전력발전 및 송·배전 계통의 안정적인 운영을 목적으로 한다. 대규모 독점 공급자에 의해 단방향으로 공급되던 전력에너지시장은 대규모 발전사업자와 신재생에너지를 포함한 소규모 생산자가 혼재하고, 생산자와 소비자의 구분이 모호해지는 P2P(peer to peer) 에너지 교환이 가능한 새로운 시대를 맞이하고 있다. 또한 ESS(Energy Storage System) 기술의 발전으로 가능해진 전력에너지의 저장은 전력의 생산과 소비 사이의 시간차를 메우고, 소비를 이전시키는 역할을 수행하여 효율적인 에너지 소비를 구현할 것이다. 에너지 부하와 가격에 관한 정보교환으로 에너지 효율을 극대화하는 차세대 전력망은 ‘발전-송전-판매’ 단계의

송·배전 시설과 전력 소비자를 연결한다. 쌍방향으로 흐르는 전력정보를 통하여 전력 공급자 또는 중계자는 탄력적인 가격정책을 구사할 수 있다. 전력 소비자는 전력 사용현황을 실시간으로 파악하고, 제시된 가격을 참고로 비싼 전력단가가 적용되는 시간대를 피함으로써 피크분산에 참여하게 된다. 또한 태양광·풍력 등 재생에너지 또는 ESS, 전기자동차에 전력피크 이전에 충전된 전력을 역으로 판매할 수도 있다. 전력시장의 참여자와 그 구조는 그림1-1과 같다.

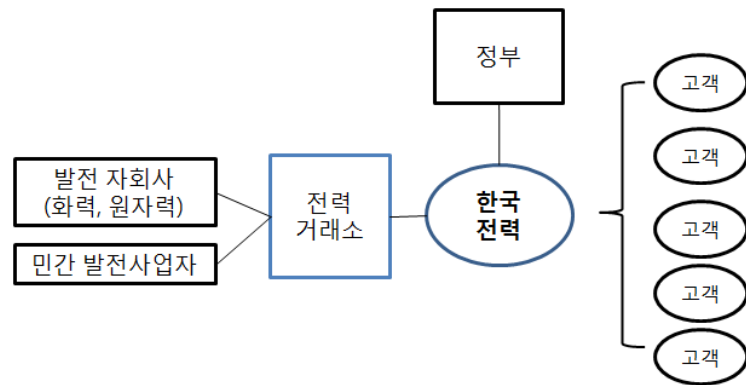


그림1-1 전력시장 구조  
 제주대학교 중앙도서관  
 JEJU NATIONAL UNIVERSITY LIBRARY

수요반응(DR; Demand Response) 가격제도는 시간·부하량에 따라 인센티브와 누진요금을 제시하여 소비자의 반응을 이끌어내는 방식이다. 인센티브 기반의 수요반응에는 장비 등을 통제하는 직접통제(Direct control) 방식, 정해진 수준까지는 할인된 가격으로 전기를 제공하고 어느 수준 이상이 될 경우 추가요금 등을 부가하는 차단/절감방식, 용량에 대해 입찰을 하는 입찰/재구매 방식, 발전량 부족이 예상되는 시간대에 직접 통제방식과 차단/절감방식을 복합적으로 사용하는 방식 등이 있다. 수요반응 가격제도의 목적은 첫째, 시간별 한계비용 개념에 기초하여 결정되는 도매시장가격과 소매가격에 한계비용을 반영함으로써 소비자에게 시간별로 차등화 된 전기요금 신호를 제공하는 것이다. 소비자는 이에 수요량 조절이라는 경제적으로 반응을 보인다. 둘째, 전력계통의 안정성에 위협이 나타나면, 전력소비 절감에 참여하는 소비자에게 인센티브를 제공하여 전력시장 및 전력계통의 안정성과 신뢰도를 향상시키는데 있다[김발호, 2010].

기존의 수요반응 가격제도에 관한 연구들은 소비자의 행동양식과 가격탄력성과 외부효과를 고려하지 않아 가격이 올라가거나 내려갈 때, 수요량을 직접적으로 줄이거나 늘릴 것으로 판단하고 있다. 이러한 모형은 소비자들이 절대적인 가격만을 보고 판단하는 경우를 전제로 한다. 그러나 일반적으로 소비자들의 제품 구매 행동에 관한 연구에 따르면 소비자들은 절대적인 가치에 의하여 재화를 구매하지 않는 것으로 분석되었다. 즉, 자신이 생각하는 제품의 가치와 가격을 비교하여 제품의 가치가 가격보다 크면 구매하고, 제품의 구매로부터 기대되는 가치가 가격보다 작을 경우 구매하지 않는다. 그러나 전기라는 제품의 경우, 그 기대가치를 계산하기 힘들며, 제품 간 품질의 차이가 거의 없으며 대체재가 없는 독특한 제품시장이다. 따라서 기존의 수요공급에 의한 가격결정 또는 구매자의 행태분석을 그대로 적용하는 데 한계가 있다. 또한 수요반응 가격제도에서 추구하는 전력 최대수요의 분산이라는 소비자 반응을 끌어내기 위해서는 소비자의 전력사용에 대한 다양한 요인을 포함하는 새로운 모형이 필요하다.

스마트 전력망의 요소기술 및 플랫폼 실증에 관한 연구에 비하여 수요반응(DR; Demand Response) 가격제도의 운영에 관한 연구가 부족한 것이 사실이다. 더욱이 실시간 변동가격의 계산을 위한 가격함수(Price Function)에 관한 연구는 드물다. 본 연구는 전력부하에 대해 선택하는 개별 수요자(전력시장 참여자)의 가격탄력도에 기반 한 수요반응 가격함수를 제안함으로써 전력망의 안정적이고 효율적인 운영에 기여함을 목적으로 하였다. 독과점의 형태를 띠고 있는 우리나라의 전력시장의 특성에 대해 정리하고, 기존의 가격결정이론과 가격모형 및 가격반응함수에 대한 고찰한다. 참여자에 따라 차별화된 제시가격을 산출함에 있어 중다회귀모형 적용 및 가격탄력도를 포함한 새로운 가격결정모형을 제안하고, 기존 연구의 가격함수와 비교분석함으로써 그 효율성을 검증하였다. 기존의 가격결정이론과 가격모형 및 가격반응함수에 대한 고찰과 더불어 미래 전력네트워크에 적용될 수 있는 가격탄력도를 포함한 ‘가격탄력도 기반 스케줄링(E ECS; Elasticity Based Energy Consumption Scheduling)’을 제안하였다. 전체 논문의 구성은 아래 그림1-2와 같다.

<p>2장. 가격결정의 이론적 배경</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 가격결정의 유형 : 원가기준/소비자기준/경쟁중심/전략적</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 가격반응함수 : 선형/곱셈형/유인모델/쿠텐베르크형</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 가격탄력도의 개념</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 헤도닉 기법</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 우리나라 전력가격의 구조 및 해외사례</li> </ul>						
<p>3장. 선행연구</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 에너지소비 스케줄링 모형 <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 게임이론 기반 스케줄링</li> <li>◦ 신뢰도 기반 스케줄링</li> </ul> </li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 기존모형 평가</li> </ul>						
<p>4장. EECS모형</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 가격탄력도 기반 에너지소비 스케줄링(EECS) 모형 <ul style="list-style-type: none"> <li>◦ 제시가격(<math>p_n^t</math>) 함수</li> <li>◦ 기준가격(<math>P^t</math>) 함수</li> </ul> </li> </ul>						
<p>5장. 분석</p>	<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th style="width: 50%; text-align: center;">시나리오</th> <th style="width: 50%; text-align: center;">비교 분석</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 1차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 부하량 변화에 따른 제시가격의 산출</li> </ul> </li> </ul> </td> <td style="text-align: center; vertical-align: middle;">▶</td> </tr> <tr> <td style="vertical-align: top;"> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 2차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기준가격 변경</li> </ul> </li> </ul> </td> <td style="vertical-align: top;"> <div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">EECS vs. TECS</div> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> PAR</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 총 전력가격</li> </ul> </td> </tr> </tbody> </table>	시나리오	비교 분석	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 1차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 부하량 변화에 따른 제시가격의 산출</li> </ul> </li> </ul>	▶	<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 2차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기준가격 변경</li> </ul> </li> </ul>	<div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">EECS vs. TECS</div> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> PAR</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 총 전력가격</li> </ul>
시나리오	비교 분석						
<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 1차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 부하량 변화에 따른 제시가격의 산출</li> </ul> </li> </ul>	▶						
<ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> 2차 EECS 모형 검증 <ul style="list-style-type: none"> <li>- 기준가격 변경</li> </ul> </li> </ul>	<div style="text-align: center; border: 1px solid black; padding: 5px; margin-bottom: 5px;">EECS vs. TECS</div> <ul style="list-style-type: none"> <li><input checked="" type="checkbox"/> PAR</li> <li><input checked="" type="checkbox"/> 총 전력가격</li> </ul>						

그림1-2 연구의 구성

제 2장에서는 가격결정의 이론에 대해 고찰하였다. 완전경쟁시장·독점시장 및 과점시장에서의 가격결정과 원가기준·소비자기준·경쟁중심·전략적 가격결정과, 선형·곱셈형·유인·구텐베르크 가격반응함수 등 가격결정의 유형에 대해 정리하였다. 제 3장에서는 ‘에너지소비 스케줄링(ECS; Energy Consumption Scheduling)’ 이라 불리는 기존 모형인 게임이론기반 ECS와 신뢰도기반 ECS에 대해 평가하고, 제 4장에서는 새로운 ECS모형으로 가격탄력도 기반 에너지소비 스케줄링 모형을 제안하였다. EECS는 실시간 작업예약정보가 예측전력수요와 기타변수를 포함하며, 예약스케줄이 누적됨에 따라 차등적으로 단가를 적용함으로써 부하량이 증가할수록 보다 높은 가격을 제시하도록 하였다. 또한 가격탄력도를 기준으로 제시가격을 수용하지 않는 참여자는 부하량을 감소하는 경우를 고려하였다.

마지막으로 제 5장에서는 2개 시나리오에 기초하여 EECS모형을 검증하고 신뢰도기반 ECS의 결과 값과 비교함으로써 제안모형의 효율성을 검증하였다. 두 모형의 비교는 전력피크-평균비율(PAR; Peak-to-Average Ratio)와 총 전력가격(Total energy price)을 평가지표로 사용하였다. 다수의 공급자와 다수의 소비자가 자유로운 선택에 의해 시장가격이 결정되는 일반 제품시장의 경우와 달리, 적절한 수요량을 유지하기 위해 가격을 결정하는 새로운 알고리즘은 지속가능한 에너지 활용의 지속가능성을 제고할 것이다.





## 제 2 장 가격결정의 이론적 배경

중앙집중적 거대 공급자 중심의 우리나라 전력시장은 시장 메커니즘이 아닌, 공공정책적 관점의 측면이 강하다. 더욱이 전력시장의 특성 상 공급자 중심의 가격이론과 소비자 중심의 가격이론 모두 그대로 적용하기에는 적합하지 않다. ‘시장실패’ 이론에서 지적하는 바와 같이 시장가격 메커니즘을 보완해야할 정부가 오히려 시장의 왜곡을 초래할 수 있는 특이한 시장인 전력시장은 기존 가격결정이론을 그대로 적용하기엔 무리가 있다.

미래의 전력시장은 다수의 공급자와 다수의 수요자로 구성되어 그 공급(가능)량과 수요량에 따라 가격이 다르게 제시되는 완전경쟁시장의 특성을 지닌다. 이것은 마치 증권시장 또는 외환시장과 같은 가격결정 구조를 가진다고 할 수 있다. 그러나 피크조절이라는 목적에 따라 시장에 참여하고 있는 공급자 또는 전력중계인은 사전에 준비된 가격결정에 관한 모형에 기초하여 에너지소비 스케줄링(ECS; Energy Consumption Scheduling) 구매에 앞서 먼저 가격을 제시한다. 특히 전체 공급의 대다수를 차지하고 있는 독점기업의 경우 전력 부하량의 적절한 통제와 분산이 가능한 가격결정이 요구된다. 현재 존재하고 있는 시장이 아닌 전력시장의 가격결정에 대해 논하기에 앞서 기존 가격결정이론에 대해 알아보고, 더 나아가 가격결정 요인과 그에 따른 가격함수에 대해 고찰하고 마지막으로 수요반응(DR) 가격에 대해 고찰하였다.

### 1. 시장 유형

전통적 제품시장은 다수의 공급자가 서로 경쟁하는 완전경쟁시장, 하나의 공급자에 의한 독점시장, 그리고 소수의 공급자에 의한 독과점시장으로 구분된다. 전력시장은 독과점의 형태를 띠고 있으나 그 가격결정은 수요와 공급에 의해 시장에 결정되기보다 공공정책적 요인에 의해 법령으로 엄격히 결정되고 있어 한계

비용과 한계수익이 일치되는( $MC=MR$ ) 점에서 가격이 형성되지 않는다.

완전경쟁은 다수의 공급자와 다수의 수요자가 참여하는 시장으로 경제학의 전통적 시장모형이다. 이는 경쟁과 이익추구라는 명제 하에서 가격이 결정되어, 특정 참여자가 시장가격 결정에 영향을 미칠 수 없는 시장이다.

완전경쟁시장에서는 공급자는 가격수용자(price taker)로서 행동하게 되며 시장 가격은 한계효용과 한계비용이 일치하는 ( $P=MR=MC$ ) 관계가 성립된다.

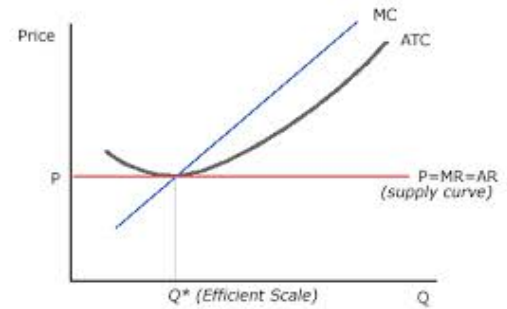


그림2-1 완전경쟁시장의 가격결정

독점(monopoly)은 하나의 공급자로 이루어진 시장으로, 경쟁이 없는 시장이다. 독점시장은 공급을 담당하는 하나의 기업이 가격설정자로서 행동하게 된다.  $MC=MR$ 이 일치하는 점에서 시장가격이 성립되며, 공급자는 초과 이익을 얻게 된다. 과점이란 소수의 생산자와 다수의 소비자가 참여하는 시장으로, 공급량의 대부분을 소수의 기업이 담당한다.

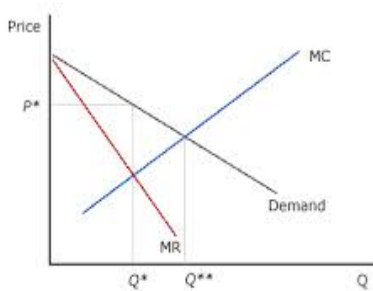


그림2-2 독점시장의 가격결정

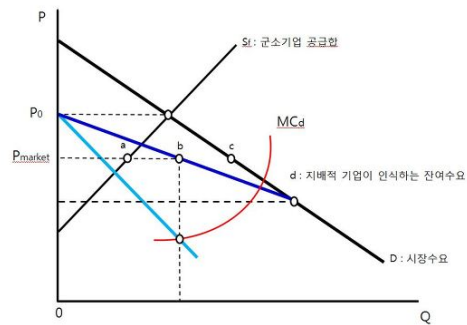


그림2-3 과점시장의 가격결정

시장은 수요와 공급의 균형점에서 가격을 형성한다. 그러나 가격 메커니즘이 완벽하지 못함으로 인해 시장실패가 발생하기도 한다. 이를 방지하기 위해 정부의 기능과 역할이 요구된다. 시장기능 한계의 원인으로 외부효과의 발생, 공공재의 부족, 독과점이 있다. 자본주의경제의 발전과 산업구조 고도화에 따라 자원배분의 비효율과 소득분배의 불평등은 심화되기도 한다. 따라서 정부의 역할과 책임이 증대되었고, 자본주의 경제시장의 불완전성을 보완하기 위한 정부의 역할도 요구된다. 이와 관련한 이론으로 ‘정부실패(Government Failure)’ 이론이 있다. 정보의 부족, 치유수단의 부적절, 치유수단을 적재적소에 활용하지 못할 때 시장실패가 제대로 극복될 수 없다. 이를 정부실패라고 하며 차선이론, 공공선택이론, 지대추구행위와 같은 현상에 대한 정책수단을 통해 전체의 효율적인 자원배분을 구현할 수 있다. 공공선택이론은 시장실패의 치유를 정부의 시장개입에 의존하기보다 정치적 의사결정과정으로 본다. 농산물의 경우, 수요공급에 의한 농산물가격지지를 위한 이중가격제와 패리티가격이 있다.



## 2. 가격결정 유형

가격형성이라고 정의되는 가격결정은 크게 경제이론 상의 가격결정과 실질적인 가격결정, 마케팅 상의 가격결정으로 구분된다. 앞서 서술한 한계원리(Marginal principle)에 따르면 가격은 한계적으로 결정되어, 한계수입과 한계비용이 같아질 때 최대이윤을 가능하다고 설명된다. 이와 다르게 총원가기준(Full-cost principle)에 의해 기업은 평균원가에 일정 이윤을 더하여 가격을 정하는 것으로 본다. 본 절에서는 가격결정 유형으로 원가기준 가격결정, 소비자기준 가격결정, 경쟁중심 가격결정, 그리고 전략적 가격결정과 이에 영향을 미치는 주요요인으로 소비자 반응, 원가구조와 경쟁상황을 살펴본다.

### (1) 원가기준 가격결정

사전에 정한 총비용에 목표이익을 가산하여 가격을 결정하는 ‘원가가산법’은 공급자 중심의 간단한 방법이나, 소비자의 실제 수요를 반영하지 못한다. 이와는 다르게 원가기준 가격결정에는 제품의 단위 원가에 일정 이익률을 가산하여 가격을 결정하는 ‘이익가산법’이 있다. 장점으로는 가격결정이 비교적 쉽고, 동일한 제품을 생산하는 업계에서 일반적으로 받아들여지는 관행적 이익률을 적용할 수 있다는 점이 있으나, 가격경쟁 환경에서는 그 이익의 크기를 정하기 어려운 점도 있다. 또한 다른 방법으로는 주어진 가격에서 총수익과 총비용(고정비+변동비)이 같아지는 매출액이나 매출 수량을 산출해 이에 근거해 가격을 결정하는 ‘손익분기점분석(Break-Even Analysis)에 의한 가격결정’이 있다. 또한 기업의 목표 투자이익률을 기초로 하여 가격을 설정하는 ‘목표투자이익률에 따른 가격결정(Target Return Pricing)’이 있다.

### (2) 소비자기준 가격결정

소비자의 제품에 대한 주관적 평가나 반응에 근거하여 가격을 결정하는 방법으로, 소비자가 느끼는 가치를 직접 물어보는 ‘직접 가격평가법’과 제품의 상대적인 지각가치를 조사하는 ‘직접지각 가치평가법’, 그리고 지각가치를 면밀

하게 조사하기 위해 소비자로 하여금 제품속성의 중요도와 속성에 대한 신념을 평가하게 하는 ‘진단적 방법’이 있다. 이 방법은 제품을 생산비용이 아닌 소비자들의 평가와 수요에 기초하여 가격을 결정하는 방법이다.

### (3) 경쟁중심 가격결정(Competition Based Pricing)

경쟁사들의 가격을 가장 중요한 기준으로 간주하는 방법으로 가장 많이 이용된다. ‘시장가격에 따른 가격결정(Going-Rate Pricing)’은 경쟁자의 가격을 우선적으로 고려하며, 주된 경쟁자의 제품가격과 비슷한 수준으로 설정하는 방법이다. ‘경쟁입찰에 따른 가격결정(Sealed-Bid Pricing)’ 방법은 여러 개의 기업들이 각각 특정 제품이나 서비스 가격을 제시하고, 최저가에 의해 낙찰자를 결정하는 가격결정이다. 이때 가격을 제시하는 기업은 앞서 살펴본 원가기준 가격결정이나 소비자기준 가격결정에 의해 제시가격을 산출한다.

### (4) 전략적 가격결정

고객에게 기업이 제공하는 가치에 대한 분석을 바탕으로 고객과의 커뮤니케이션 방법을 개발하고, 가격결정 프로세스에 따라 가격수준을 설정한다. 가격결정에 영향을 미치는 요인으로는 앞서 본 가격결정이론의 원가구조 이외에도 소비자 반응, 경쟁상황, 유통경로 그리고 정부규제와 같은 외부적 요인이 있다. 소비자 반응으로는 3절에서 자세히 다룬 가격탄력도가 대표적이다.

원가구조는 변동비와 고정비로 구성된다. 변동비는 생산량 증가에 따라 비례적으로 증가하는 비용으로 재료비·노무비 등이 속한다. 고정비는 생산량이나 판매량의 규모와 상관없이 일정하게 지출되는 비용으로 임대료·광열비 등이 있다. 손익분기점 분석은 원가구조와 매출의 관계를 추정함으로써 특정 가격을 적용할 경우 예상 수익을 계산할 수 있다.

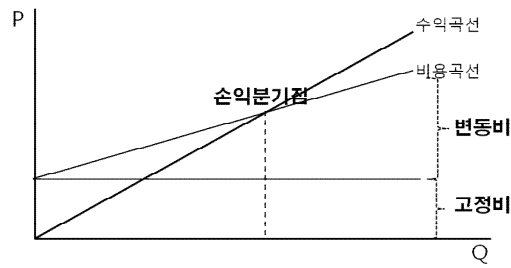


그림2-4 손익분기점

독점이나 독점적 경쟁에서는 시장에서 유리한 위치에 있으므로 고가격전략을 취하고 과점경쟁 상황에서는 소수의 경쟁자들이 시장을 지배하는데 대부분 경쟁 제품과 비슷한 수준에서 가격을 책정한다. 완전경쟁 상황에서는 수요와 공급에 따른 경쟁적 가격이 형성된다. 정부는 물가를 안정시키며 경쟁을 촉진하고 특정 제품의 수요를 억제하는 등 각종 정책적 차원에서 제품가격에 법령·세금부과를 통해 가격에 영향을 미친다. 또한 가격의 요인으로 들 수 있는 유통경로는 대형 유통업체 또는 구매자가 강력한 구매력을 이용하여 공급자에게 가격인하를 요구한다.

일반적인 제품시장의 대부분은 복수의 생산(공급)자와 소수의 구매(수요)자가 있는 경우에 해당한다. 그러나 전력시장은 이와 같은 경쟁시장과는 다르게 운영되고 있다. 특히 안정적인 전력망의 운영을 최우선의 목적으로 하며, 공공복리적 측면에서 생산자의 이익을 엄격하게 통제하고 있다. 경제학적 가격결정에 관한 이론을 그대로 적용하기에는 무리가 있다.

### 3. 가격반응 함수

가격반응함수 또는 가격함수란 일정기간 혹은 일정 시점에서의 가격과 판매량의 관계를 나타내는 함수를 의미한다. 즉, 수요관리 옵션(DMO; demand management option)에 대한 수요반응을 설명하는 수리적 모델이다. 여기서 수요관리 옵션이란 수요패턴 변화를 야기하는 요소들로 광고효과, 가격 등이 있다. 즉 가격반응함수는 수요관리 옵션들 중 가격에 따른 수요의 반응을 수리적으로 표현한 모델을 말한다. 가격반응함수는 경제학 이론의 수요함수에 따라 우하향 곡선의 형태를 보인다. 가격반응함수에 대하여 대부분의 경제학자는 절대적 혹은 상대적인 실제가격에 근거해 가격 반응함수에 대한 설명을 하고 있지만, 심리학자들과 일부 경제학자는 가격인지적 관점에서 가격반응함수에 대한 이론적 근거를 제시하고 있다. 소비자 집단의 가격반응함수는 개별소비자의 가격반응함수의 합으로 도출될 수 있으며, 개별 소비자의 가격반응함수는 개별 소비자가 해당 제품에 대해 가지는 기준가격(또는 준거가격)에 의해 결정된다. 기준가격은 어떤 소비자가 어떤 제품을 사기 위하여 지불할 용의가 있는 최대 가격을 말하며, 곧 제품에 대한 한계효용을 의미한다[이정우 외, 2009].

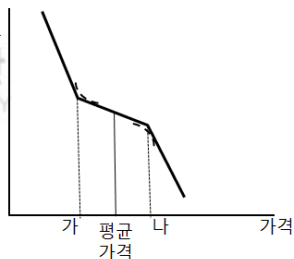
그러나 현실적으로 모든 소비자에게 같은 가격을 책정하는 기존 시장에 비해 소비자와 시간대에 따라 다른 가격이 적용될 전력시장의 가격반응함수를 도출하는 것은 쉽지 않은 문제이다. 가격과 판매량, 그리고 가격탄력도를 수식으로 표현하는 가격반응함수는 크게 선형모델, 곱셈형 모델, 유인모델, 구텐베르크 모델로 구분된다. 표2-1의 구텐베르크 모델에서 굵은 선은 판매량  $q_i$ 를 나타내고, 점선은 가격탄력도를 나타낸다. 그리고 평균가격  $\bar{p}$ 는 네 유형 모두 2로 고정되어 있다. 그림에서 네모로 표시된 부분 안에서는 네 개의 함수가 모두 아주 비슷해 보인다. 따라서 가격이 어느 일정한 범위 안에서만 움직인다면 실증적으로 어느 모델이 현실에 가장 잘 들어맞는지를 파악하기가 거의 불가능하다[유필화, 1991].

우리나라 전력시장에 해당하는 독점시장의 가격반응함수로는 선형모델, 곱셈형 모델, 지수함수 모델이 있다. 일반적인 경쟁상황 하에서 가격반응함수는 실용적 측면에서 현실 반영정도와 단순성의 정도에 따라 선형, 곱셈형, 유인, 구텐베르크 모델의 4가지로 구분된다.

표2-1 시장유형별 가격반응 함수

시장 유형	가격반응 함수
독점 시장	<p>【로그/2차 함수】</p> <div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="450 779 874 1196"> <p>A. log function</p> </div> <div data-bbox="880 779 1350 1196"> <p>B. Quadratic function</p> </div> </div>
경쟁 시장	<p>【선형모델】</p> <p>세 개의 매개변수로 구성된 선형모델은 단순하다는 장점을 가지고 있다. 모든 가격과 가격평균에 관계없이 어디서나 가격이나 평균가격이 1만큼 변할 때마다 판매량이 일정만큼 변한다고 설명하는 것은 큰 폭의 가격-평균가격 차이에서는 적용되기 힘들다. 좁은 가격범위에서 움직이는 경우에는 유효함에 따라 그 범위가 제한적으로 적용되어야 한다.</p> <p>【곱셈형 모델】</p> <p>실증연구에서 폭넓게 사용되는 이 모델은 비교적 간단하며 가격반응이 대칭이 아닌 것으로 설명한다. 가격이 낮을수록 가격반응함수의 기울기가 크기 때문에 가격이 낮을수록 판매효과는 큰 반면에 가격이 높을수록 감소효과는 더욱 작아진다.</p>



시장 유형	가격반응 함수														
경쟁 시장	<p><b>【유인모델】</b></p> <p>상표의 매력도에 시장점유율이 결정된다고 설명한다. 시장점유율의 예를들면, 상표 매력도를 다른 상표매력도의 합계로 나누어 계산한다. 단 각 매력도는 여러 요소의 곱의 합으로 이루어진다.</p> $\text{시장점유율} = \frac{\text{상표 } i \text{의 매력도}}{\text{다른 상표들의 매력도의 합계}}$														
	<p><b>【구텐베르크 모델】</b></p> <p>가격과 평균경쟁가격 차이가 적으면 제품의 판매량 또는 시장점유율은 그 비율보다 작게 영향을 받고, 가격과 평균가격 차이가 어느 이상이면 판매량이 그 비율보다 크게 영향을 받는 것으로 설명한다.</p> <p>‘가’와 ‘나’ 사이에서는 고객이 제품이 제품에 대한 선호를 가지고 있고 다른 제품을 구입에 따른 비용으로 지속적으로 구매를 한다.</p>  <table border="1" data-bbox="462 1344 1340 1680"> <thead> <tr> <th>모 델</th> <th>종속변수</th> <th>수식</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>선형</td> <td><math>q_i</math> 또는 <math>m_i</math></td> <td><math>a - bp_i + c\bar{p}</math></td> </tr> <tr> <td>곱셈형</td> <td><math>q_i</math> 또는 <math>m_i</math></td> <td><math>a(p\sqrt{p})^b</math></td> </tr> <tr> <td>유인</td> <td><math>m_i</math></td> <td><math>a_0 + a^i p_i^{bi} / \sum_j a_j p_j^{bj}</math></td> </tr> <tr> <td>구텐베르크</td> <td><math>q_i</math> 또는 <math>m_i</math></td> <td><math>a - bp_i - c_i \sinh(c_2(p_i - \bar{p}))</math></td> </tr> </tbody> </table>	모 델	종속변수	수식	선형	$q_i$ 또는 $m_i$	$a - bp_i + c\bar{p}$	곱셈형	$q_i$ 또는 $m_i$	$a(p\sqrt{p})^b$	유인	$m_i$	$a_0 + a^i p_i^{bi} / \sum_j a_j p_j^{bj}$	구텐베르크	$q_i$ 또는 $m_i$
모 델	종속변수	수식													
선형	$q_i$ 또는 $m_i$	$a - bp_i + c\bar{p}$													
곱셈형	$q_i$ 또는 $m_i$	$a(p\sqrt{p})^b$													
유인	$m_i$	$a_0 + a^i p_i^{bi} / \sum_j a_j p_j^{bj}$													
구텐베르크	$q_i$ 또는 $m_i$	$a - bp_i - c_i \sinh(c_2(p_i - \bar{p}))$													

#### 4. 가격탄력도

가격이 수요에 미치는 영향력의 크기가 ‘수요의 가격탄력도’이다. 제품의 가격이 조금만 올라가도 수요가 급감하는 경우를 탄력적 수요라고 하고, 반대의 경우를 비탄력적 수요라고 한다. 경쟁제품 혹은 대체품이 없거나 적을 때, 경쟁제품과 비교하여 우월한 제품특성을 가질 경우, 구매패턴의 변화가 서서히 일어나는 경우 비탄력적 수요에 해당된다.

전력가격결정에 관한 연구들은 소비자의 행동양식과 가격탄력성과 기온 등 외부효과를 동시에 고려하지 않고 있다. 소비자들이 절대적인 가격만을 보고 판단하는 경우를 전제하는 것이다. 그러나 소비자의 구매의사결정은 기계적이지 않으며, 보다 다양한 요인에 의한다. 일반적으로 소비자들의 물건 구매 행동에 관한 연구를 통해 소비자들은 절대적인 가치를 가지고 물건을 구매하기도 하나, 기준가격(reservation price)으로 물건을 구매할 때 본인이 생각하는 물건의 가치와 가격을 비교함으로써 그 차이가 + 이면 구매하고, - 이면 구매하지 않는다. 이와 유사하게 전력소비에 있어서도 전기의 가격을 보고 그 소비량을 결정하기도 하지만 가격의 변동을 보고 합리적인 범위의 변동일 경우 소비량을 조절하기도 하는 것이다. 따라서 소비자의 전력사용에 대한 다양한 요인을 포함하는 새로운 모형이 필요하다. 또한 날씨와 근무시간에 따르는 피크시간대 등을 고려하였을 때, 외부에 의해 결정되는 요인이 엄연히 존재하는 전력시장과 소비자의 구매의사결정에 관한 추가 연구가 필요하다.

가격이 내려가면 사려는 사람(수요)은 증가하고 판매하는 사람(공급)은 감소한다. 그러나 제품별·시장별 가격 변동에 따른 수요·공급의 변동에도 정도의 차이가 있다. 가격이 조금만 변해도 수요가 급격하게 늘어나거나 줄어드는 상품이 있는 반면, 가격이 아무리 변해도 수요의 변동 정도가 미미한 상품이 있다. 이러한 차이는 각 상품에 따라 수요의 ‘가격탄력성’이 다르기 때문이다. ‘가격탄력성’이란 한마디로 가격변동에 대한 민감도를 뜻한다. 가격탄력성이 높은 상품은 가격이 조금만 변동해도 수요가 획기적으로 늘어나거나 줄어든다. 일반적으로 귀금속이나

레저용품 같은 사치재의 성격이 강한 상품들이 이에 해당한다. 이와 반대로 가격 탄력성이 낮은 상품의 경우는 가격이 변동하더라도 수요가 크게 증가하거나 감소하지 않는데 쌀과 같은 생활필수품이 이에 해당한다. 가격변화량 대비 수요량 변화에 대한 비율로 계산되어지는 가격탄력도는 아래 수식(1)과 같이 계산된다.

$$\eta = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \left[ \frac{x}{y} \times \frac{\Delta y}{\Delta x} \right] = \frac{xf'(y)}{f(x)} = \frac{x}{y} \times \frac{dy}{dx} = \frac{d(\log y)}{d(\log x)} \quad (1)$$

이와 같이 구해지는 탄력성 계수는 일반적으로 (-)값을 가진다. 그러나 그 절댓값으로 환산하여 1보다 크면 ‘탄력적’, 1과 같으면 ‘단위 탄력적’ 이라고 하고 1보다 작으면 ‘비탄력적’ 이라고 정의한다. 가격(세로축)과 수요량(가로축) 그래프로 표시하면 탄력적일수록 완만한 기울기를 가진 직선으로 표시된다.

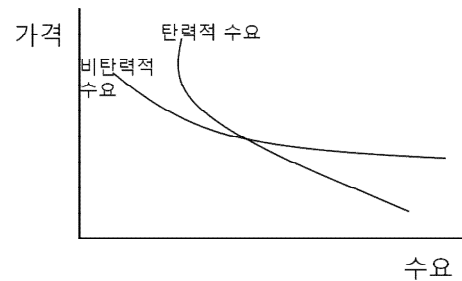


그림2-5 수요의 가격 탄력성

수요반응 전력가격에 수요탄력성 개념을 적용함에 있어 가격 변화와 수요량 변화에 대한 인과 순서가 일반적인 시장과 다르다. 일반적 시장에서는 가격이 변화함에 따라 수요량이 변동되지만, 전력시장의 수요반응가격 체계에서는 수요량에 대해 전력공급자가 변동되는 가격을 제시하는 메커니즘을 가진다.

## 5. 헤도닉 기법(Hedonic Method)

기술진보와 상품이 다양해지고, 소비자의 기호와 구매패턴이 빠르게 변하고 있는 현대사회에 시간의 개념을 포함하는 전력 가격탄력도를 도출하기 위해서는 새로운 방법이 필요하다. 더욱이 실시간 또는 일정 간격으로 변화하는 전력가격에 따른 가격탄력도를 구하기 위해서는 다른 접근법이 필요하다. 따라서 기존에 각종 지수(index) 보정에 활용된 기법에 대해 알아보고, 수요반응 가격에 적합한 접근법을 찾고자 한다.

환경오염에 대한 화폐적 가치를 평가하는 방법으로 개발된 헤도닉 기법은 Rosen과 Freeman[1974]에 의해 체계화 되었다. 헤도닉 기법은 부동산 및 일반상품 뿐만 아니라 비시장 재화에 대한 화폐적 가치를 추정하는 방법으로 많은 연구에서 사용되고 있다. 환경변화에 의해 유발되는 환경편익이나 비용을 측정하는 방법은 시장을 통해 평가할 수 있는지 여부에 따라 사용가치의 시장가치평가, 사용가치의 비 시장가치평가, 그리고 비사용가치의 비 시장가치평가로 구분할 수 있다. 헤도닉 기법은 “재화의 가치는 해당 재화에 내포된 특성(attributes)에 의해 결정 된다”는 가정을 전제로 하며, 여기서 재화의 특성이란 인간에게 효용을 제공하는 재화의 구성요소라고 할수 있다. 이질적인 재화를 구입한다는 것은 해당 재화에 내포되어 있는 특성들의 묶음을 산다는 것과 같은 의미라고 할 수 있다. 이 경우 이질적인 재화의 가격은 해당 재화에 내포되어 있는 특성들의 가격과 양에 의해 결정된다[강임호 외, 2001].

이 특성들의 가격을 ‘헤도닉 가격’ 또는 ‘잠재가격’ 이라고 부르기도 하며, 자동차의 예를 들면 그 속성(스피드, 안락함, 안정성 등)들로의 크기로부터 회귀함으로써 재화의 가격을 추정한다. 헤도닉 기법으로 직접 비교하기 어려운 대체의 복합적인 변화에 대해서도 순수 가격변동을 계산할 수 있다. 그러나 이 기법에는 가격 및 품질 특성과 같은 광범위한 데이터가 필요하고, 함수추정을 위한 관측치도 필요하여 상당한 노력이 수반된다. 헤도닉 가격함수는 가격과 요인의

관계를 설명함에 있어 이론적인 관점에서 효용에 대한 수요-공급의 시장균형 결과를 의미한다. 따라서 헤도닉 기법은 잠재가격(shadow price)을 도출함으로써 시장에서 독립적이고 명시적으로 거래되지 않는 가치에 대한 평가를 가능하게 한다. 헤도닉 가격모형은 3단계에 걸쳐 도출된다. 제 1단계로서 헤도닉가격함수를 추정한다. 제 2단계는 구매로부터 얻을 수 있는 가치 대한 암묵가격을 도출해 내는 것이다. 마지막으로 제 3단계에서는 변수에 대한 수요곡선을 추정한다. 각 단계를 구체적으로 살펴보면 먼저 헤도닉가격함수를 추정하기 위하여 구매가격 P의 제반 특성 Q에 대한 회귀분석을 실시한다. 만약 j번째 주관적 가치(P)의  $q_j$ 에 대한 편미분 값인  $\partial P / \partial q_j$ 는 가치의 한 단위 증가가 구매가격에 미치는 영향의 정도를 나타낸다고 해석된다. 제 2단계에서 구해지는 이러한 암묵적 한계가격(IMP: Implicit Marginal Price)을 구매가격에 대한 헤도닉가격(HP: Hedonic price)이라고 부른다. 헤도닉가격함수가 선형함수가 아닌 이상, 암묵적 한계가격은 요소가치의 수준에 따라 변하게 된다. 또한 암묵적 한계가격은 환경질의 개선을 위해 소비자가 지불해야 하는 가격을 나타내고 있으므로 대기질 개선에 따른 한계비용으로 해석할 수 있다[이용만, 2008].



헤도닉 기법은 이용가치를 암묵가격에 의해 벨류에이션하는 방법으로 사용가치의 비 시장가치평가의 범주에 속하며, 그 화폐적 가치를 산출하는 함수가 헤도닉 가격모형(hedonic price model)이다. 헤도닉 가격모형은 시장이 명시적으로 존재하지 않을 경우 대체시장을 이용하여 간접적으로 가치를 측정할 수 있는 방법을 제공한다. 예를 들어 주택이나 직업의 가치를 화폐적 가치로 평가하기 위해 이를 구성하는 여러 특성들의 가격으로 분할하고, 각 특성에 가중치를 부여함으로써 주택이나 직업의 가치를 환산할 수 있다. 헤도닉 가격모형의 핵심은 여러 다양한 특성의 가격들에 의해 결정된다는 것이다. 이러한 관계를 다음과 같은 헤도닉 가격함수로 표현된다.

$$P=f(q_1, q_2, \dots, q_n)$$

헤도닉 회귀분석과 관련된 주요 계량경제학 논점은 변수선택과 함수형태 선정의 두 가지로 나누어 볼 수 있다. 이 가운데 변수선택의 문제는 회귀분석에 사용할 특성을 결정하는 문제이다. 여기에 세부적인 문제로 유실변수의 문제, 다중공선성의 문제, 개별변수의 유의성의 문제가 있다. 다중공선성은 어떤 변수가 다른 변수들과 밀접한 관계를 맺고 있을 때 발생하며, 추정 계수의 신뢰도를 떨어뜨리는 문제를 야기 시킨다. 다중공선성이 의심될 때는 조건 수(condition number) 등을 이용하여 이를 탐지할 수 있으며, 다중공선성을 유발시키는 것으로 의심되는 변수를 제거할 수 있다. 이러한 관점에서 다중공선성의 치유과정은 결국 수집된 품질특성 가운데 회귀분석에 사용할 변수를 선별하는 과정의 하나로서 볼 수 있다. 유실변수의 문제는 헤도닉 함수 추정을 위한 자료수집에서 주요 특성에 관한 자료를 수집하지 못할 때 발생한다. 진정한 헤도닉 회귀모델로부터 설명변수가 누락된 상태에서 추정된 계수는 일치성을 만족시키지 못하게 되고 편의를 갖게 된다. 중요하지만 정성적으로 표현될 수밖에 없는 속성들은 측정이 어렵기 때문에 변수로 고려되지 않는 경우가 많아 유실변수 문제의 가능성이 높아진다. 그러나, 이에 대응하여 더미(dummy)를 사용하게 되면 관측하지 못한 정성적 품질요소들의 직·간접적 효과를 반영할 수 있다.

그림2-6에는 두 명의 소비자 A와 B의 요소의 가치에 대한 한계편익(MB)곡선, 즉 한계 지불의사액(MWTP)곡선이 나타나 있다. A와 B는 각각 효용수준  $q_A$ 와  $q_B$ 를 구입하고 있으며, 바로 이 수준에서는 한계편익과 암묵가격이 일치하고 있다. 즉 암묵적 한계가격이 소비자의 한계지불의사액과 동일한 수준을 의미한다.

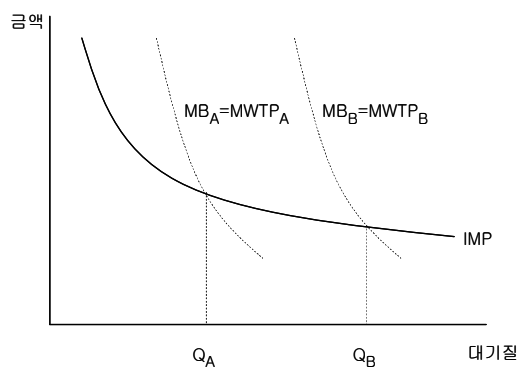


그림2-6 헤도닉기법을 통한 가치평가

제 3단계는 다양한 사회경제적 특성을 갖고 있는 소비자들의 대기질에 대한 한계편익을 도출하기 위해 이루어지는데, 대기질에 대한 역수요함수(inverse demand function)를 추정하게 된다. 다시 말해 위에서 추정한 잠재적 한계가격, 곧 한계 지불의사액을 종속변수로 놓고 환경변수와 소득 및 기타 여러 사회경제적 변수에 대해 회귀분석함으로써 얻어진다[이정동 외, 2002].

헤도닉 기법을 이용한 함수 추정에는 함수추정 주기가 중요하다. 시간이 지남에 따라 시장에서의 제품에 대한 소비자의 선호 또는 기술을 변화한다. 일반적으로 헤도닉 기법은 소비자의 기호변화 주기가 짧은 시장에 적용되는 경우가 많기 때문에 가능한 함수추정 주기를 짧게 하는 것이 좋다. 다만 현실적인 제약으로 인해 일정한 추정주기를 설정한다. 헤도닉 함수의 재추정과 모델의 재구축은 구분되어야 한다. 재추정은 헤도닉 모델을 변하지 않고 데이터만 새로운 것으로 갱신하여 함수추정을 반복하는 것이다. 헤도닉 모델의 재구축은 시장의 변화를 고려하여 자료수집 내용 변경, 변수와 함수형태 결정의 전 과정을 다시 수행하는 것을 의미한다. 함수 형태 설정과 추정계수의 신뢰성 문제는 계량경제학 관점에서 기법을 적용한다. 가격탄력도에 헤도닉 기법 적용에 있어 Rosen(1974)은 헤도닉 함수가 수요자에 의해 영향을 받지 않는 것으로 설명한다. 즉 수요자에 따라 헤도닉 함수형태가 변하지 않고, 이질적인 재화의 가격과 속성들의 양(quantity)을 활용한 특성의 균형가격을 추정이 가능하다.

헤도닉 함수형태의 선정과 관련하여 이론과의 일치성, 추정의 적합도, 지수도플의 편의성이라는 세 가지 관점에서 접근할 수 있다. 첫째, 이론과의 일치성 여부에 있어서 최근 헤도닉 기법이 발전함에 따라 함수형태의 선택에 대한 이론적인 근거를 이용하는 것이다. 그러나, 현실에 대한 강한 가정이 전제되므로 실증 분석을 할 때 이론적인 근거를 바탕으로 함수형태를 선택하는 데 한계가 있다. 둘째, 추정의 적합도를 통해서 함수형태를 선정할 수 있으나, 유일한 기준의 적합도를 저할 수 없고, 결과 간에 직접 비교할 수 없으므로 반로그, 로그-로그, 선형 등의 구체적인 함수형태에 대하여 비선형 검정을 통해서 함수형태에 대한 판단 근거를 확보하는 것이 보통이다. 비 선형 검정에는 Box-Cox 검정, BM검정, PE 검정 등이 있다. 구체적이고, 간단한 함수형태를 사전에 선정하여 비교하지

않고 Box-Cox 변환을 포함한 일반적인 헤도닉 함수 형태를 설정한 다음 최우추정법으로 직접추정하면서 계수에 대한 가설정을 통해 제약적 함수형태를 유도해가는 방법도 생각할 수 있다. 여기에는 보통의 Box-Cox함수, 확장된 Box-Cox함수, 제한된 Box-Cox Tidwell함수, 이차형 Box-Cox함수, 제한된 이차형 Box-Cox함수 등이 있다. 그러나 Box-Cox 변환에 대한 직접 추정은 추정해야할 파라미터의 수가 많아지고, 함수선정의 고려사항인 지수도출에서의 편리성을 확보할 수 없는 단점이 있다[강임호 외, 2001].





## 6. 전력가격 결정

가격을 통한 전력 수요조절에 있어 핵심은 최대 전력피크(Peak) 분산을 위한 변동가격 수준의 결정이다. 전력부하의 분산을 통해 전력피크를 낮추는 스마트한 미래의 전력시스템에 도입될 수요반응 가격체계는 실시간 전력수요를 반영하는 변동 가격모형인 것이다. 현재 적용되고 있는 고정가격모형은 원가기준 가격결정으로 전기의 생산·공급에 투입된 비용과 적정투자보수를 합하여 산출되는 모형이다. 비용으로는 영업비용과 적정법인세 비용 등을 더하고, 적정투자보수는 요금기저와 적정투보율을 곱하여 계산된다. 이와 같은 회계학적 관점의 가격결정 모형은 가격을 수단으로 전력수요 분산 즉 전력피크 분산의 목적과 매 시간 변하는 수요에 대응하지 못하는 문제를 가지고 있다.

미래의 전력가격 산출은 전력 생산·공급자와 전력 소비자가 완전경쟁 시장에서 수요와 공급의 원리에 의해 1일 전 또는 실시간으로 시간대 별 가격이 결정되는 방향으로 진행될 것이다. 향후 등장하게 될 전력 소매사업자는 도매업자 또는 전력회사로부터 구입한 전력을 소비자에게 판매하여 수익을 추구함과 동시에 소비자의 수요반응을 촉진함으로써 효율적인 전력시장 운영을 가능케 한다. 이 때 소매 사업자가 소비자의 수요를 예측하고 소비자의 수요반응을 이끌어냄으로써 공헌도만큼 인센티브가 지급되고 사업자는 인센티브를 포함한 자신의 총이익을 최대화하는 가격을 결정하는 것이 중요하다. 도매시장에서 시간대별 도매가격은 1일전에 결정되고 소매업자는 기존 가격에 대한 수요 탄력도 데이터에 근거하여 소비자 별 탄력도를 예측한다. 익일의 수요를 계산하여 이익을 극대화하며 수요반응을 활성화하는 것을 목적으로 하는 시간대별 소매가격을 결정할 수 있다[문용마, 2014].

스마트 전력망 즉, 스마트그리드와 관련된 기술은 크게 AMI(Advanced Meter Infrastructure), 수요반응(Demand Response), 배전관리, 고전압 전송기술 등으로 구성된다. 배전관리 기술은 관련 장비 및 시스템을 관리하는 시스템으로 변전소 자동화를 위한 센서와 구동기 등을 주요 관련 장비로 꼽을 수 있으며, 계량·조정·

전달 등의 모든 전자 장치와 관련된 기술을 포함한다. 고전압 전송 기술은 전력 통제 능력과 송전 능력 강화를 위해 고압의 전력을 송전하는 총체적 기술들을 일컫는다. 수요반응은 빌딩, 가정 등 스마트미터의 전력계량정보, 예상요금과 같은 다양한 정보를 소비자에게 제공함으로써 에너지절감에 참여하도록 하는 에너지소비 스케줄러(ECS)와 동일하다. 수요반응 모듈은 네트워크를 통해 전력 효율을 극대화하는 전력관리 장치로서 가장 기본적인 인프라 역할을 한다. 수요반응 기술은 쌍방향 커뮤니케이션을 통해 축적된 빅데이터를 바탕으로 안정적인 전력망을 유지·관리하는 것이다. 소비자의 전기사용 패턴을 분석하여 정확한 수요를 예측하는 기술로 동태적 가격 정책의 근거가 된다.

#### (1) 수요반응(Demand Response) 가격

수요반응 전력가격제는 소비자가 자신에게 유리한 가격을 선택할 수 있도록 하는 가격제도로 수요관리의 일환으로 시행되는 가격기반의 수요반응 프로그램에서 적용되는 동태적 요금제를 일컫는다. 수요반응 프로그램은 인센티브 기반과 가격기반의 수요반응으로 구분할 수 있다. 그 동안 단위 전력량 당 고정가격으로 공급되었던 전력가격은 수요상황에 따른 수요량 변화에 따른 변동가격을 제시함으로써 사용자에게 구매여부를 선택하게 하는 가격제도이다. 소비자의 수요변화를 유도하는 수요반응 프로그램은 시간에 따라 달라지는 인센티브를 제공함으로써 소비자의 반응을 이끌어내는 방식과 가격을 조정함으로써 수요를 조정하는 방식으로 구분된다.

인센티브 기반의 수요반응은 장비 등을 통제하는 직접통제(Direct control) 방식, 정해진 수준까지는 할인된 가격으로 전기를 제공하고 어느 수준 이상이 될 경우 추가요금 등을 부가하는 차단/절감방식(Interruptible/ Curtailable), 용량에 대해 입찰을 하는 입찰/재구매(bidding/ buyback)방식, 자원 부족이 예상되는 특정기간에 직접 통제방식과 차단/절감방식을 복합적으로 사용하는 방식(emergency demand reponse) 등이 있다. 인센티브 기반의 수요반응은 전력공급자가 제공하는 인센티브에 의해 수요자가 부하를 차단 또는 절감하는 형태를 띈다. 가격기반 수요반응 프로그램은 변동가격에 소비자가 선택적으로 반응하는 방식이다. 수요반응 가격제는 가격기반의 수요반응에서 활용되는 다양한 동태

적 전력요금을 제시함으로써 소비자로 하여금 수용과 거부를 선택할 수 있도록 함으로써 수요반응을 유도하는 것을 의미한다.

가격 기반의 수요반응 정책으로는 시간대별 차등 요금제(TOU; Time of Use), 실시간 요금제(RTP; Real-Time Pricing), 임계 피크시간대별 요금제(CPP; Critical Peak Pricing) 등이 있다. 수요반응 가격제는 수요자에게 다양한 요금선택 권한을 제공함으로써 전력시장의 자원배분 문제를 해결한다. 전력수요가 높고 낮은 시간대에 차등화 되는 요금을 제시하고 소비자가 이를 선택하게 하여 소비자의 수요반응을 이끌어 낸다. 전력수요가 높은 경우에는 높은 요금을 부과하고, 반대의 경우 낮은 요금을 부과한다. 실시간요금제는 매시간 부하량의 변화에 따라 차별화된 가격이 적용된다. 단일요금제는 공급비용 증감에 따른 위험을 공급자가 부담함으로써 소비자는 변동이 없는 가격을 적용받기 때문에 가격변동에 대한 위험이 없다. 이에 반해 수요반응 가격제는 공급비용 변화가 가격변화에 의해 소비자에게 위험이 전가되는 결과를 의미한다.

표2-2 수요반응 프로그램의 유형[Albadi & El-Saadany, 2008]

가격기반 프로그램	인센티브 기반 프로그램	
	고전적 프로그램	시장기반 프로그램
<ul style="list-style-type: none"> <li>· TOU (Time of Use)</li> <li>· CPP (Critical Peak Pricing)</li> <li>· ED-CPP (Extreme Day CPP)</li> <li>· EDP (Extreme Day Pricing)</li> <li>· RTP (Real Time Pricing)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 직접제어</li> <li>· 간접방식</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· 수요 입찰</li> <li>· 긴급 DR</li> <li>· 용량 시장</li> <li>· 송배전/공급 시장</li> </ul>

그러나 수요반응 가격정책에 대한 수리모형은 그렇게 많지 않다. 즉, 수요반응에 적용될 실시간 가격결정 수리모형이 많지 않다. 신수진 등은 경쟁상황에서 최적 경매방법에 따라 가격을 결정하는 방식을 제안하거나 또는 김항석 등은 신경망 알고리즘을 이용하여 전기가격을 예측하는 연구들이 제시되기도 하였다. 또한 Momoh는 네트워크 기반의 수리모형을 제시하였고, 최태섭 등은 Home Energy Management System에서 각각의 기기들이 연동되어 있는 상황에서 소비자가 느끼는 효율성을 최적화하는 방향을 제시 하였다[이유수, 2013].

## (2) 수요반응 전력가격제의 특징

현 전력요금제는 평균비용에 입각하여 전력가격을 결정하는 단일요금제로, 실제 한계비용을 반영하지 못하고 있다. 시간별 요금이 불변하기 때문에 사용자는 피크시간대와 비피크시간대 구분에 신경을 쓸 필요가 없다. 따라서 전력피크 시에는 부하량이 급증하는 현상을 보인다. 따라서 피크시간대에 전력을 주로 사용하는 소비자는 다른 소비자로부터 보조를 받는 것과 같다. 실제 전력피크의 높은 공급비용에 비해 낮은 요금을 부담하고 있으며, 반대의 경우 비피크시간대 공급비용에 비해 더 높은 요금을 부담하고 있는 것이다.

수요반응 전력가격은 소비자 간 후생 불평등을 개선할 수 있다. 선택적 요금제는 평균비용에 의한 요금결정에서 한계비용에 의한 요금결정 구조로 진화하는 과정으로, 전력공급 비용의 절감효과에 기여한다. 수요반응 가격제도는 공급비용이 높은 피크시간대에 요금이 높아지고, 낮은 시간대에 요금이 낮아지기 때문에 기존의 소비패턴을 고집하는 소비자는 보다 높은 비용을 부담하게 된다.

그림2-7은 단일요금제, 실시간요금제 등 다양한 요금제에 대한 위험과 잠재적 보상에 대한 관계를 나타내고 있다. 그림에서 우측으로 갈수록 위험이 높아지고, 위쪽으로 갈수록 잠재적 보상이 높아지고 있다. 그림에서 제시된 다양한 선택요금제는 소비자에게 가격변동의 위험이 높아질수록 수요반응을 통하여 잠재적인 보상이 커진다는 것을 의미하고 있다. 단일요금제는 위험과 잠재적 보상이 거의 0에 가까운 반면 실시간요금제는 위험이 가장 크고 잠재적 보상도 가장 높다[이유수, 2013].

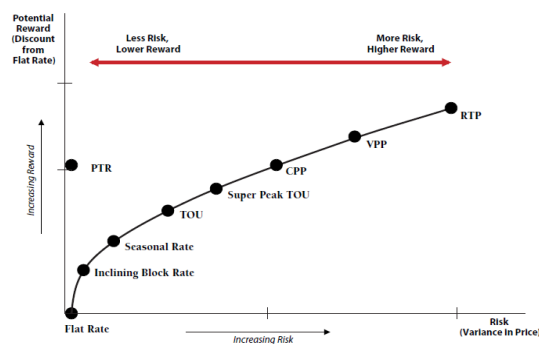


그림2-7 변동가격의 위험 및 보상

여러 가지 선택적 요금제 중에서 어떤 선택요금제를 택할 것인가는 소비자의 위험선호 정도에 따라 결정된다. 계시별 요금제는 2~3개의 시간대별로 차등화된 요금적용으로 단일요금제보다 요금위험 부담이 있다. 최대피크요금제는 전력피크 시간대에 훨씬 더 높은 전력요금이 부과되고, 전력부하가 평균이하일 때 할인요금이 부과된다.

변동요금제 도입은 소비자의 수요패턴을 고려하여 자발적인 참여자를 대상으로 우선 시작되는 것이 바람직하다. 초기에는 수요반응 프로그램에 대한 홍보, 교육, 인식 등의 부족으로 등록이 많지 않거나 수요패턴에 따라서는 수요반응을 하지 않고도 유리한 소비자만 가입할 가능성이 있다. 그러나 다양한 동태적 요금제를 의무적 형태로 진행할 경우 소비자의 수요패턴에 따라서는 피크 시 수요 조정 또는 반응이 어려워져 특정 소비자의 후생손실이 발생할 수 있다. 따라서 우선은 전력요금제를 선택적으로 시행하여 어느 정도 선택적 요금제 시행에 따른 가입 정도와 홍보 및 교육 등을 통하여 선택적 요금제에 대한 인식을 제고시킬 필요가 있다. 그리고 일정 시간이 지난 후 가입 정도 등을 고려하여 의무적으로 전환하는 것도 하나의 방법이다. 대규모 수용가의 일정 부분에 대해 의무적으로 최대피크요금제 또는 실시간요금제로 전환하도록 할 경우 수용가가 이전보다 전력사용에 대한 지출비용을 줄이기 위해서는 소비패턴에 변화를 고려해야 한다. 동태적 요금제를 의무화한 이후에도 이전과 동일한 전력소비 패턴을 지속할 경우 요금제 설계의 특성상 이전보다 훨씬 더 높은 비용을 지불해야 하기 때문에 어떤 형태로든 전력소비에 대한 절약 또는 효율향상에 대한 방안을 강구할 것으로 예상된다. 특히 피크 시간 동안에 많은 전력소비량이 있는 소비자에게 추가적 비용지출의 위험이 있다. 이 경우 단기적으로 전력소비를 줄이거나 경부하 시간대로 이전하는 방식으로 소비패턴의 변화를 추진하지만 장기적으로는 보다 효율적인 에너지 설비투자에 관심을 두고 효율적인 에너지소비로 전환할 가능성이 클 것으로 예상된다. 시간대별로 차등화된 동태적 요금제가 선택적으로 주어질 때와 의무적으로 전환해야 할 경우 효과측면에서는 후자의 경우가 클 것으로 보이지만 우선은 학습 및 적응과정 등에 대한 시험기간이 필요할 것이다. 따라서 다양한 선택적 요금제의 제시는 수용가가 자발적으로 요금제 선택에 따른 가격변화에 능동적으로 소비패턴의 변화를 가져올 수 있도록 하는

기회를 제공하는 것으로 이해될 수 있을 것이다[이유수, 2013].

### (3) 국내외 선택적 요금제 사례

우리나라는 일부 지역에 대해 시범적인 수요반응 전력가격제를 시행하고 있으나, 그 대상 선정 및 실시간요금제 인식 상의 한계가 있어 전면적인 시행을 위한 검토와 준비가 필요하다. 전면적 시행을 위해서는 쌍방향 디지털 전력계량기와 같은 인프라의 보급과 더불어 관련 법규정의 정비와 함께 보다 정밀한 가격결정 모형이 필요하다. 본 절에서는 그동안 추진된 국내외 사례를 중심으로 살펴보고자 한다.

2011년 주택용 소비자에 대해 선택형 계시별요금제를 시범적으로 실시하였으며, 단일요금제에서 다양한 요금제를 시행하기로 하였다. 1,100가구를 대상으로 한 시범사업 결과에 기초하여 단계적인 확대를 추진 중이다. 또한 최대전력피크 요금제를 통해 대규모 산업 및 기업을 대상으로 전력피크 분산을 위한 추진계획도 수립하여, 희망하는 소비자에게 전력피크 시간대에 높은 요금을 부과하는 정책으로 평상시의 3~5배에 해당되는 요금을 부과하는 설계를 진행 중이다.

선택형 요금제 및 수요관리형 인센티브 요금제를 골자로 하는 최근 전기요금 인상안(2013. 11)을 살펴보면, 전력사용조정이 어려운 중소기업을 위한 선택형 요금제와 중규모 사업장을 위한 자율절전 유도형 인센티브 요금제, 그리고 대규모 사업장을 위한 피크절감 투자유도형 차등요금제를 제시하고 있다.

미국 피크요금제의 대표적인 사례로는 캘리포니아주 북부지역의 PG&E를 들 수 있다. 2008년부터 시작된 최대피크요금제는 2011년 24,000호에 달하는 가정의 자발적 참여자를 대상으로 피크요금제를 시행하고 있다. 그 내용을 살펴보면, 5월부터 10월의 여름기간에는 오후 2시부터 7시까지 피크시간대를 설정하여 피크 할증요금 kWh당 60센트를 부과하고 있다. 반면 non-피크 시간대 할인은 kWh당 3~4센트로 4:1에서 11:1사이의 피크 대 비피크 가격비율을 나타낸다. 미국은 각 주나 지역에 따라 수직통합과 경쟁도입의 정도 등 운영구조에서 차이가 존재한다. 90년대 중반부터 전력시장에 부분적 또는 전면적으로 경쟁을 도입하기도 하였으며, 여전히 수직통합적으로 운영되는 지역도 있다. 경쟁체제의 지역

에서는 독립적 계통운영자를 통해 도매시장에서 전력거래가 이루어지고, 소매 시장에서는 다양한 동태적 요금제를 시행중 이다.

미국 중서부 독립계통운영자에 운영되는 미시간 주는 도매전력가격이 입찰을 통하여 결정되지만 부분적으로 규제된 시장에 속한다. 실시간으로 변화되는 도매요금에 비해 소매요금을 고정되어 있다. 4백만 수용가에게 전력을 공급하고 있는 메이저 전력회사인 디트로이트 에디슨 에너지社(DTE)와 Consumers Energy가 87%이상의 시장점유율을 나타낸다. DTE는 처음 17kWh까지는 6.726센트를 부과하고, 추가 사용량에 대해서는 8.136센트를 부과하는 2단계 요금제도를 시행중 이다. 한편, Consumers Energy는 DTE와는 달리 10월부터 5월까지 kWh당 4.7517센트를 부과하고, 6월부터 9월까지의 피크기간에는 매달 첫 600kWh에 대해 4.7417센트와 추가에 대해서는 kWh당 8.4687센트를 부과하고 있다.





(4) 현 전력가격 체계

우리나라의 전력가격은 전기요금 산정기준에서 규정하고 있는 것처럼 공공서비스의 측면이 강하다. 규정에 따르면 “공공의 이익증진과 전기사업의 건전한 발전을 도모하기 위하여 적정한 전기요금을 산정함에 있어서 객관적이고 일관성 있는 적정원가와 적정이윤에 관한 기준을 정함을 목적으로, 공급에 소요된 총괄원가를 보상하는 수준에서 결정되어야 한다(산업자원부 고시 제2006-25호, 2006.3.)” 고 되어있다. 총괄원가는 전력의 공급을 위한 적정원가에 적정투자보수를 더하여 산정하고 있다. 기본요금과 전력량요금의 2부 요금제를 원칙 차등요금과 누진요금 등을 채택하고 있다.

전기요금 산정에 사용되는 기초 회계자료는 산업자원부령에 의한 전기사업회계규칙에 따라 한국전력공사, 한국수력원자력(주), 남동발전(주), 남부발전(주), 동서발전(주), 중부발전(주), 서부발전(주)의 회계자료에 기초한 적정원가를 계산한다. 적정원가에는 매출원가에 적정법인세비용, 판매비와 관리비를 더한 기초금액에 발전사업자의 세전손익과 영업외손익과 감가상각비와 송배전이용요금 수입을 반영한다. 적정투자보수란 ‘전기를 생산·공급하기 위하여 직접 활용되고 있는 실제 투자된 자산에 대한 적정한 보수’ 로, 규정에 의해 요금기저에 적정투자보수율을 곱하여 계산한다. 요금기저는 회계연도의 기초·기말평균 순가동 설비 자산액을 포함하고, 적정투자보수는 전기사업의 위험도, 물가상승률, 자본비용, 공급리수준, 금리상환계획, 회계연도 재투자 및 시설확장계획, 물가전망 등을 포함하여 결정한다. 적정요금 단가는 총괄원가를 당해 회계연도의 판매량으로 나누어 계산되는데, 이와 같이 산출되는 총괄원가는 아래 그림2-8과 같다.

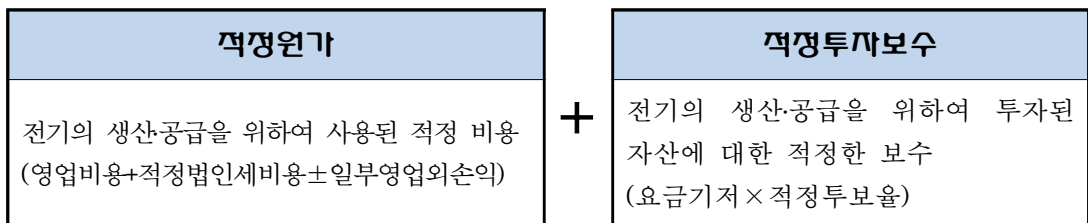


그림2-8 전력원가 구조



표2-3 현 전력가격

구 분		판매비중 (%)	판매단가 (원/kWh)	원가회수율 (%)
주택용	일반주택	15.9	107.30	114.8
	심야전력	2.8	24.52	48.8
	소 계	18.7	94.72	108.9
일반용		19.9	106.04	133.7
산업용		57.3	58.30	96.1
농사용		2.3	43.04	48.0
교육용		1.0	90.16	116.4
가로등		0.7	65.92	101.3
평 균		100	74.65	106.4

향후 미국의 사례와 같이 우리나라의 복잡한 요금체계의 개선과 변동요금제 등의 개선이 필요한 상황이다. 특히 주택용 전기요금의 경우 원가 대비 114.8%에 달하며, 7단계의 복잡한 구조와 18.5배에 달하는 비정상적인 누진제가 문제로 지적된다.

표2-4 가정용 전력가격

월사용량(kWh)	100	200	300	400	500	600
사용량요금(원)	6,780	20,750	40,930	71,330	116,080	191,850
단 가(원/kWh)	67.80	103.75	136.43	178.33	232.16	319.75
요금 지수(%)	65	100	131	172	224	308

전력요금에 대한 연구 중 자본자산 가격결정 모형(CAPM)을 적용한 회계적인 원가기준 가격결정방식에 의해 분석하고 있는 ‘현행 전기요금의 적정성 분석(전한경 외, 2004)에 의하면 아래의 3가지 방식을 제안하였다. 그 가운데 두 번째 모회사기준 요금기저 산정방식이 적절한 것으로 보았다.

#### 1) 통합 산정방식

자기자본 및 타인자본에 해당하는 발전자회사의 자산을 포함한 사업자산에 대한 연결재무제표 기준의 요금기저 방식이다. 발전 자회사의 순이익 및 지급이자비용인 투자보수도 적정투자보수율로 규제한다. 필요 수입액 산정을 위해 발전자회사의 투자보수는 예상실적이 아닌 적정투자보수율 기준으로 산정되어 반영된다. 모회사의 도매전력구입비용에 반영된 자회사의 실적 영업이익은 적정원가 산정에서 제외한다. 발전자회사의 요금기저도 전력사업과 관련된 자산만을 대상으로 한다.

#### 2) 모회사 기준 산정방식

한국전력의 송·배전·판매 사업부분의 사업 자산에 대한 발전자회사에 대한 투자자산을 합하여, 발전자회사에 대한 투자자산의 지분 평가이익을 사업부분의 투자보수와 합하여 적정투자보수율을 기준으로 규제하는 방식이다.

발전자회사의 투자보수(당기순이익) 부분은 예상실적이 아닌 적정투자보수율을 기준으로 재평가되어 필요수입액 산정에 반영한다. 만약 발전자회사의 실적 지분 평가이익이 자기자본에 대한 적정 투자보수를 초과하면, 그에 상응하는 송·배전 및 판매부분의 세후 투자보수의 크기를 축소하여 모회사 전체의 투자보수를 적정수준으로 규제하는 방식이다. 한국전력의 도매전력구입비용에 반영되어 있는 발전자회사 발전사업 부분의 자기자본 투자보수는 적정원가 산정에서 제외하고, 발전자회사의 투자보수 중 타인자본에 대한 보수지급이자비용 부분은 예산실적치가 그대로 투자보수가 아닌 도매전력구입비에 포함되어 필요수입에 반영된다.

### 3) 송·배전·판매회사 기준 산정방식

송·배전 및 판매사업 부문의 자산만을 요금기저로 산정하는 방식이다. 발전 자회사에 대한 투자보수는 투자보수율 규제대상에서 제외하여, 송·배전 및 판매사업 부문의 투자보수를 적정 투자보수율 기준으로 한다. 발전 자회사에 대한 투자자산을 모회사의 전력공급사업 목적 이외의 투자로 간주하여 발전자회사로부터의 지분법 평가이익을 투자보수 계산에서 제외한다. 모회사 매출원가에 포함되어 있는 도매전력구입비용은 그대로 적정원가로 인정되어 필요수입액에 반영되며, 발전자회사의 투자보수는 규제 대상에서 제외되기 때문에 발전자회사의 실적 투자보수는 적정 여부를 불문하고 도매 전력구입비용은 그대로 모두 원가에 반영된다[정한경, 2004].



## 제 3장 선행 연구

전력소비는 AMI(Advanced Metering Infrastructure)와 같은 쌍방향 전력통신을 이용하여 RTP 단위가격을 확인하고, 제시된 단위가격을 수용할지 여부를 결정하는 스케줄링이 가능하다. 이는 스케줄링이 누적됨에 따라 차등적으로 단가를 적용함으로써 사용자는 자신의 허용범위 내의 가격대를 선택하여 작업 시간대별 가격이 낮은 시간대로 재배치하거나 작업을 취소함으로써 전력수요 분산이라는 기능을 달성할 수 있다. 본 장에서는 기존의 에너지소비 스케줄링에 관한 두 가지 모형에 대해 살펴보고, 가격탄력도에 기반한 새로운 모형을 제시한다. Amir-Hamed Mohsenian-Rad 등은 게임이론을 이용하여 에너지 소비 스케줄링(Game Theoretic Energy Consumption Scheduling; GECS) 모형에서 게임 참여자들이 자신의 시간별 전력사용량에 따른 전력요금의 최소화를 위한 선택을 설명하였다[박상준 외, 2013]. 다른 에너지 스케줄링 모형인 신뢰도 기반 스케줄링(Trust Energy Consumption Scheduling; TECS)에서는 사용자가 피크타임 사용량을 절감에 참여한 정도를 나타내는 신뢰도가 적용된 전력가격을 산출하는 가격함수를 제시하고 있다.

### 1. 게임이론기반 스케줄링(GECS)

GECS는 1일(24시간)로 한정된 시간적 범위에 대해 여러 전력기기를 사용하는 게임 참여자(Player)를 대상으로 스마트미터를 통한 전력소비 스케줄에 따른 시간당 전력부하를 계산하고, 이에 따른 가격을 제시함에 있어 합리적 선택을 하는 방법에 관한 모형을 설정하고 있다. 우선 사용자 개별부하량( $l_n^h$ )의 계산은 전력부하량을 발생하는 전력기기  $a_n$ 개를 가진 사용자  $n$ 의 시간당 전력사용량의 합으로

계산되는 ECS(Energy Consumption Scheduling) 가격함수는 다음과 같다.

$$l_n^h = \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h, h \in H \quad (1)$$

$x_{n,a}^h$  : 사용자의 a개의 전력기기에 대한 시간 당 전력소비 예약

h : 전력기기 사용시간(H=24)

GECS에서는 1일 총 사용량은 불변한다는 전제하에 PAR(Peak-to-Average Ratio)와 부하량에 따른 요금의 최소화를 추구하는 참여자의 전략을 모형화한 것으로 하루 동안의 총 전력수요를 미리 설정하여 소비전력량에는 변화가 없으나(ex. 전기차 16kWh), 사용자의 전력소비 시간을 늦춤으로써 전력피크를 낮출 수 있도록 하였다.

여러 사용자의 부하량을 합한 총 전력부하량의 계산은 가동을 늦출 수 있는 전력기기와 냉장고 등 계속 가동되어야 하는(가동시간 이동이 불가능한) 전력기기로 구분하고, 최저 대기전력수준(minimum standby power level)을 임의로 설정하고 나머지 이동 가능한 유연한 에너지 소비 스케줄링에 따른 총 전력부하량( $L_h$ )을 계산하였다.

$$\sum_{h \in H} L_h = \sum_{n \in N} \sum_{h = \alpha_{n,a}}^{\beta_{n,a}} x_{n,a}^h \quad (2)$$

GECS모형은 50개의 다른 시나리오를 수행하여 PAR값의 최소화를 위한 시뮬레이션 실행하여 그 평균값을 1.8325에서 1.8315로 약 0.05% 개선함을 보였다. 에너지 비용에서는 보다 큰 성과를 보여 평균 비용이 \$51.83에서 \$48.04로 절감됨을 보였다. 여러 명(n)의 사용자가 있을 때 그 최적화를 위한 전략함수식으로 PAR와 전력요금(energy cost)의 최소화를 만족시키는 모형을 아래 알고리즘을 이용하여 도출하였고, 각각의 경우에 대한 가격비교를 통해 보다 유리한 조건을 수락하는 게임이론 기반 에너지 스케줄링 모형을 수식(2)와 같이 제시하고 있다 [Amir-Haned Moshenian-Rad et al., 2010].

- 1: Randomly initialize  $l_n$  and  $l_{n-1}$
- 2: **Repeat**
- 3: At random time instance Do
- 4: Solve local problem [1]
- 5: **IF**  $x_n$  change compared to current schedule Then
- 6: Update  $x_n$  according to the new solution.
- 7: Broadcast a control message to announce  $l_n$  to the other ECS units across the system.
- 8: **END**
- 9: **END**
- 10: **IF** a control message is received Then
- 11: Update  $l_n$  accordingly.
- 12: **END**
- 13: **Until** no ECS unit announces any new schedule.



$$\text{maximize } P_n(x_n; x_{-n}). \quad (3)$$

Payoffs :  $P_n(x_n; x_{-n})$  for each user  $n \in N$ , where

$$\begin{aligned} P_n(x_n; x_{-n}) &= -b_n \\ &= -\Omega_n \times \left( \sum_{h=1}^H C_h \left( \sum_{m \in N} \sum_{a \in A_m} x_{m,a}^h \right) \right) \end{aligned} \quad (4)$$

게임모형에 근거하여 사용자는 자신의 전력요금을 최소화하는 선택을 거듭하여, 상대방의 전략을 주어진 것으로 보고 게임참여자 자신에게 최적인 전략을 선택할 때 그 결과가 균형을 이루는 최적 전략인 내쉬균형(Nash equilibrium)을 이루는 것으로 설명한다. 이 내쉬균형은 상대방의 전략이 미리 공개되면, 참여자는 자기 전략을 고집하는 전략의 집합을 의미하며 이러한 전략 조합이 두 참여자에 의해 동시에 예측되었을 때 이 게임은 내쉬균형에 도달하게 된다.

## 2. 신뢰도기반 스케줄링(TECS)

게임이론 기반의 에너지 소비스케줄링과 다른 연구로 베이즈 확률이론을 적용한 신뢰도 기반 게임이론에 관해 박상준, 김승욱(2013)은 전일 동일시간 대 사용량을 비교하여 평균 사용량보다 큰 부하량을 사용하는 참여자에게는 높은 가격을 지불하게 하고, 적은 부하량의 참여자에게는 낮은 가격을 지불하게 함으로써 사용자들로 하여금 스케줄링에 참여하는 TECS(Trust Based Energy Consumption Scheduling)모형에서 하루동안 총 전력가격을 비교하여 GECS보다 우월함을 증명하였다.

전력 공급자와 사용자 사이에서 서로 정보를 공유하는 수요반응을 통해 공급자는 특정 시간대의 전력가격을 결정하고 결정된 전력가격을 베이즈 이론을 통한 신뢰도와 각 사용자가 전력에 기초하여 분담케 한다. 신뢰도란 사용자가 꾸준히 피크타임 사용량을 적게 유지하였는지를 나타내는 척도로, 사용자는 이 신뢰도가 적용된 전력가격에 의거하여 전력사용에 변화를 줌으로써 자신이 지불해야 하는 비용을 최소화한다. 신뢰도란 특정 개체가 어떤 행동을 하리라 기대하는 믿음의 정도로, 주어진 사전 확률에 새로운 근거가 제시될 때 사후 확률로 갱신된다는 베이즈 정리(Bayes' Rule)을 적용하여 전력사용자의 신뢰도를 수식(5)와 같이 계산하였다.  $P(I)$ 는 사전확률을,  $P(N)$ 은 정규화 상수를,  $P(MI)$ 는 명제 I에 대해 증거 N을 통해 갱신된 사후확률을 의미한다. 초기에는 사전확률 분포에 대한 정보가 없으므로 첫 번째 반복단계에서는 균등분포를 따른다고 가정하고, 사용자의 행동(N)을 토대로 신뢰에 대한 확률분포를 갱신한다[박상준 외, 2013].

어떤 사용자의 실제 전력 사용량이 전날 사용량을 넘지 않는 비율을  $q(0 \leq q \leq 1)$ 라고 했을 때, 첫번째 반복단계에서 그 사용자의 비율  $q$ 에 대한 믿음의 분포는  $f_t(q)$ 로 나타낼 수 있고 이는 곧 사전 확률분포가 된다. 첫 반복단계의 사전확률 분포만 정의된다면 임의의 반복단계 t에서의 사후확률분포 값을 재귀적으로 처리함으로써 t 반복단계에서의 협조비를  $q$ 에 대한 확률분포  $f_t(q)$ 의 기대값이 되고, 베타분포의 기댓값과 t번 갱신된 신뢰도를 도출하였다.

$$P(MI) = q^{c_t}(1-q)^{n_t}$$

$$P(N) = \int_0^1 P(MI)P(I)dq = \int_0^1 q^{c_t}(1-q)^{n_t}f_t(q)dq \quad (5)$$

$f_t(q)$  : t번째 반복단계에서 그 사용자의 비율 q에 대한 신뢰도의 분포

이와 같이 산출된 신뢰도를 전체 가격함수에 대입하여 그 값을 GECS 대비 2.38%의 효율성이 있음을 증명하였고, 하루 동안 사용자별 전력가격 비교에서 총 10명 중 6명이 1890.667 만큼 낮은 가격을 보여 그 우수성을 입증하였다. 또한 GECS 대비 5.45%의 낮은 PAR 값을 보여 전력피크 분산에서도 우수한 것으로 분석되었다. TECS의 가격함수는 다음과 같다.

$$P_n^t = P^t \times \frac{f(l_n^t, l_n^t, Q) \times \frac{1}{T_n}}{\sum_{m \in N} f(l_n^t, l_n^t, Q) \times \frac{1}{T_m}} \quad \text{s.t. } T_n = \frac{\alpha_n}{\alpha_n + \beta_n}, \text{ and } T_m = \frac{\alpha_m}{\alpha_m + \beta_m} \quad (6)$$

$P_n^t$  : 사용자 n의 특정 시간대 t에서의 전력 가격

$l_n^t$  : 사용자 n이 시간대 t에 사용한 부하량

$l_n^t$  : 사용자 n이 전날 시간대 t에 사용한 전력량



### 3. 평 가

게임이론기반 에너지소비 스케줄링(GECS) 모형은 개인의 전력구매 효용극대화 전략에 기반 하여 반복적 실행으로 최적의 부하량과 전력비용을 도출하는 모형으로, 개인 시장참여자의 효용극대화 게임이론을 제시하였다. GECS는 게임 상대의 룰이 주어져 있다는 가정 하에 자신의 이익을 추구하는 개인의 선택이 전체 전력피크와 전체 전력비용을 최소화하는 결과를 보인다고 분석하였다. 그러나 대다수의 전력시장은 서론에서 서술한 바와 같이 완전경쟁시장이 아니며, 수요와 공급에 의해 한계비용-한계수익-평균비용이 같아지는( $MC=MR=AC$ ) 가격에서 시장가격이 결정되지 않는다. 전력시장은 독점 혹은 과점시장이며, 많은 국가들이 지속가능한 성장을 위해 에너지정책에 따라 전력가격을 주요한 정책수단으로 채택하고 있기 때문이다. 또한 수요반응 가격메커니즘은 전력피크의 분산을 통한 전력생산비용의 절감과 효율적인 전력망의 운영을 목적으로 삼기 때문에, 다양한 인센티브 가격제도가 시행되고 있다. 신뢰도기반 에너지소비 스케줄링(TECS)에서는 부하량 조절에 지속적으로 참여하고 있는 신뢰 있는 참여자에 대한 인센티브의 성격이 강하다.

TECS 모형은 개별 참여자의 행동적 특성에 따른 확률을 수요반응가격의 계산에 반영하였다는 특징이 있다. 동일 시간대 전력 부하량을 넘지 않는 확률을 ‘신뢰도’로 정의하고 사전확률에서 시작하여 반복적인 시도에 의해 갱신된 사후확률에 근거한 가격함수를 제안하고 있다. 0에서 1까지의 값을 가지는 신뢰도는 전체 참여자와 개별 참여자의 가격함수에 반영됨으로써 차별화된 가격을 제시하고 있다. 그러나 확률분포에 근거한 신뢰도는 그 횟수가 늘어날수록 일정한 값으로 수렴될 수밖에 없다. 따라서 수차례 많은 반복으로 갱신된 사후확률에서 개인의 선택이 제시가격에 반영될 정도로 유의한 값으로 반영되기 힘들다(이 선택의 시점이 전력피크일 수 있다). 즉, 전체 갱신의 횟수가 많을수록 1,2회의 이벤트가 확률값에 미치는 영향은 미미하다. 따라서 TECS 가격함수 상의 베이지(Bayes’ Rule) 정리에 의한 신뢰도 계산에 적절한 일정 횟수에 대한 제한을 두

어 적용하는 것이 필요하다.

앞서 살펴본 게임이론기반 에너지소비 스케줄링(GECS) 모형은 공공서비스로서의 전력시장의 특성을 제대로 반영하지 않은 완전경쟁시장의 가격설정 메커니즘에 충실함으로써 우리나라 여건에 적용하기 어려운 측면이 있다. 또한 신뢰도기반 에너지소비 스케줄링(TECS)모형은 과거의 데이터에 근거한 확률분포에 의한 가격결정으로 소비자의 행동패턴과 가격제시 이후의 참여자 행동을 고려하지 않는 문제가 있다. 따라서 우리나라에 적용가능하면서 원래 의미의 에너지소비 스케줄링(ECS)에 충실한 새로운 모형을 제 5장에서 제안코자 한다. GECS와 TECS의 장단점을 분석하면 표3-1과 같다.

표3-1 기존 모형 장단점 분석

	〈장 점〉	〈단 점〉
GECS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 부하량, 전력가격 및 소비자 구매에 따른 효용에 대한 이론 명확</li> <li>• 반복된 선택에 의한 개별 참여자 행동 모델화</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 완전경쟁시장에 적합</li> <li>• 인센티브에 의한 효과분석 미흡</li> </ul>
TECS	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사용자 참여에 대한 인센티브 반영</li> <li>• 전력 구매에 따른 가격 외의 요소 반영</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가격함수의 변수인 기준가격(<math>P^t</math>)산출에 과거 가격만을 고려</li> <li>• 전력수요 분산에 대한 분석 미흡</li> </ul>

## 제 4장 EECS 모형

모형(model)이란 자료분석을 위해 연구자가 설정하는 변인들 사이의 이론적인 관계를 말한다. 회귀분석은 자료를 분석하여 무엇인가를 찾아내는 것이 아니라 연구자가 가정하는 모형을 미리 정해놓고, 자료가 그 모형에 부합하는지 여부인 합치도(goodness-of-fit)를 판단하는 분석기법이다[정한경, 2004]. 본 장에서는 회귀모형을 이용하여 수요반응 가격모형을 제시하고, 수요탄력도를 포함한 참여자의 개별 제시가격을 통한 수요반응에 대해 설명한다.

차세대 전력망은 기존의 단방향 전달체계에서 정보시스템과 에너지 분산처리 및 저장기술들을 이용하여 쌍방향 전력체계를 구축함으로써, 전력회사 이외의 장소에서 신재생 에너지원 등을 통해 전력을 생산하고 전력을 자체 해결함과 동시에 잉여전력은 스마트 전력시장에 되팔 수 있는 새로운 전력망이다. 이때의 가격 결정은 전기를 소비하려는 소비자와 공급자 간의 수요와 공급에 의한 시장 메커니즘은 물론, 공공목적을 반영하는 가격정책 등과 같은 외부환경에 의해 결정된다. 이 때 결정된 가격에 따라 소비자들은 전력구매 여부를 선택하고, 선택된 소비에 의해 전체 소비전력량을 조절하게 된다. 피크시간에는 비싼 가격이 책정되어 피크전력량을 완화함으로써 수요평준화와 효율적인 에너지의 운영을 구현하게 된다.

스마트 전력망 도입을 위해 우리나라 정부는 2030년까지 총 30조에 달하는 투자를 계획하고 실증단지 및 실증기술과 인프라 구축에 나서고 있다. 이러한 스마트그리드 전력시장에서 생산-공급을 조절하여 전체 전력망의 안정성을 유지하는 주요기제가 실시간변동가격(RTP) 메커니즘이다. 이는 매 시간 전체 수요량에 대해 다르게 제시되는 변동가격으로 사용자의 자율적인 선택에 의해 전력소비 피크를 분산시킬 수 있는 가격제도를 의미한다. 소비자의 전력기기 지연가동은 전력부하의 분산으로 최대전력수요(Peak)를 낮춤으로써 초과수요를 억제하여 전체 전력망의 실패를 방지하는 역할을 한다.

현재까지 이루어진 연구는 스마트 전력네트워크의 기기 운영을 위한 방안과 신규서비스 및 전력시장운영 측면에 대해서는 미비하다. 특히 전력의 효율화에 가장 중추적인 역할을 수행하는 수요반응 가격제도의 알고리즘 및 가격모형에 관한 연구는 아직 초기단계에 있다. 따라서 본 연구는 변동 전력가격 산출에 가격탄력도를 포함한 회귀모형을 적용하였으며, 기존 신뢰도 기반모형(TECS)에서 제안한 결과와 비교분석함으로써 제안 가격산출 알고리즘의 효율성을 검증하였다. 가격변화량 대비 수요변화량을 의미하는 가격탄력도는 과거의 자료를 기반으로 계산되므로 선 변동가격 제시-수요량 변화를 유발하는 여러 속성으로부터 기댓값을 산출하였다. 수요반응 변동가격 산출을 위한 가격함수를 제안하고, 기존 연구와 비교분석함으로써 그 효율성 제고에 기여하고자 한다. 수요반응(DR) 가격메커니즘은 수요량 조절을 위한 가격 산출을 위한 가격모형과 전력소비 스케줄링을 통한 제시가격 확인 및 수용/거부로 구성된다.

엄격한 의미에서 스케줄링 모형은 예약가격 산출 모형이라고 보아도 무방하다. 그러나 기존 연구들에서 ‘에너지소비 스케줄링’으로 사용하고 있으므로 본 연구에서도 그대로 사용하였다. 약어로는 ECS(Energy Consumption Scheduling)라고 표현되고 있다. 기존 게임이론 또는 신뢰도 기반 모형과 비교하여 ‘가격탄력도’ 개념을 포함하는 ‘가격탄력도 기반 스케줄링 모형(EECS; Elasticity Energy Consumption Scheduling)’을 제안한다. 가격탄력도는 제품시장에서 가격에 대한 소비자의 소비성향에 관한 개념으로, 변동가격에 대한 소비자(사용자)의 구매태도를 반영한다. EECS는 에너지소비 스케줄링을 통해 사용자에게 전달된다. 사용자는 전력기기를 사용하기 전에 자신에게 적용될 가격을 확인 후 그 가격을 수용 또는 거부할지를 선택한다. 사전에 가격함수에 의해 산출된 제시가격을 수용할 경우 스케줄러를 통해 미리 전력사용을 예약하는 것이다. 반대의 경우, 즉 제시가격이 너무 높다고 판단되면 자신의 사용예약을 취소하거나 부하량을 조절할 수 있다. EECS의 프로세스는 다음 그림4-1과 같다.

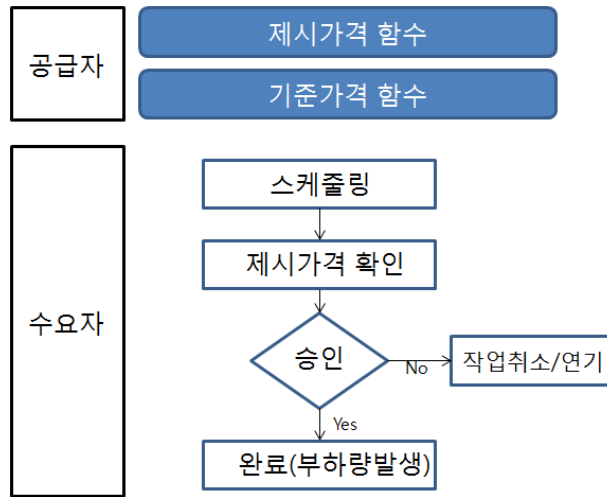


그림4-1 EECS 구조

공급자 또는 전력거래소는 제시가격과 기준가격의 함수에 기초하여 수요자에게 개별 예정가격을 제시함으로써, 자신의 위험을 수요자에게 이전시키게 된다. 앞서 1장에서 살펴본 바와 같이 에너지소비 스케줄링을 통한 수요반응 전력가격 제도는 생산자의 추가 전력에 대한 위험을 변동가격의 제시를 통해 추가 비용을 수용하는 전력구매자에게 이전함으로써 전력수요 분산을 달성하는 메커니즘이다. 이와 같은 프로세스는 향후 스마트 전력망 구축에 따라 AMI 또는 스마트 단말의 형태로 구현될 것이다.

## 1. EECS(Elasticity Energy Consumption Scheduling) 개요

현재 적용되고 있는 고정가격모형은 원가기준(Cost Based) 가격결정모형가격조정을 통한 전력수요의 분산이라는 다분히 정책적인 목적과 매 시간 변하는 수요에 대응하지 못하는 문제를 가지고 있다. 또한 앞 절에서 살펴본 두 모형은 우리나라의 공공서비스적 전력시장의 특성을 제대로 반영하지 않은 완전경쟁시장의 가격설정 메커니즘에 충실하거나, 과거의 데이터만을 반영함으로써 그 이후의 참여자 행동설정을 고려하지 않는 문제가 있다.

미래 스마트 전력시장은 다음과 같은 특징을 가진다.

첫째, 판매에 따른 이익의 극대화를 추구하는 일반 제품시장의 ‘정태적 가격반응함수’를 적용하기에 적절하지 않은, 시간의 개념이 포함된 ‘동적 가격반응함수’를 적극 고려해야 한다. 전력은 소비가 동시에 집중되는 현상을 지닌다. 이것은 소비자가 매장을 방문하거나 제품 정보를 비교하는데 소요되는 노력과 시간이 거의 없기 때문에, 기온과 같은 외부요인에 의해 수요가 동시에 집중되기 때문이다. 따라서 수요의 급증을 미리 반영하는 동적 가격반응 함수로 예상되는 수요폭증에 선제적으로 대응하는 것이 필요하다.

둘째, 소비자들의 구매행위의 지연에 따른 효용의 증감 또는 구매시점에 따르는 전력 품질의 차이가 없다. 단지 원하는 시간대에 전력사용에 따른 욕구충족이라는 주관적 가치가 있을 뿐이다. 이는 유통기한 및 시간에 따라 품질의 차이를 보이는 타 제품에 비해 균일한 품질을 지니는 것을 의미한다. 따라서 무차별적 가격은 소비자의 즉각적인 소비행태를 보이는 요인으로 작용한다. 따라서 현재와 같은 정태적 가격제도의 전력이라는 상품은 대체제가 없는 수요의 가격탄력도가 낮은 구매패턴을 보인다. 또한 전력이라는 제품은 타 제품과 같이 저장 불가능에 가까워 소비자가 필요로 할 때 번번이 구매해야 하는 제품으로 낮은 수요의 가격탄력도의 한 원인으로 사료된다.

셋째, 생산에 따른 한계비용이 매출에 비해 현저히 낮아 거의 '0'에 가깝지만, 생산한계를 넘어서는 피크가 발생 시 이에 따른 비용은 현저히 증가한다는 점이다. 이미 우리나라도 지난 2011년 9월 블랙아웃을 경험하였다. 순간적인 수요급증은 전체 전력망의 실패로 귀결되면, 이에 따른 산업계와 일반 소비자의 피해는 생산자의 이익 보다 크다. 따라서 정부는 전력사업자의 수익추구가 아닌 비용 방어적인 공급자의 시장대응을 우선시 한다.

마지막으로, 전력IT의 발달은 오프라인 시장에서 이루어지던 판매자와 구매자 간 가격협상을 가능하게 한다. 쌍방향으로 공유되는 미래의 스마트전력 환경은 스마트 플레이스(홈 네트워킹) 분야와 더불어 변동되는 제시가격과 이에 기초한 작업량의 예약이 가능해진다. 따라서 실시간 수요반응 가격제도가 가능해지며, 소비자에게 제공되는 전체 전력부하 정보와 자신의 보유 전력기기에 대한 부하 정보 등을 손쉽게 제공받을 수 있다. 실시간으로 취득되는 정보는 구매협상에 활용되며, 거래비용을 줄인다.

소비자들은 전력소비에 있어 각자 제약사항을 가진다. 냉장고와 같은 전력기기는 임의적으로 사용여부를 선택하거나, 사용시간을 지연하는 데 한계가 있다. 그러나 전기자동차(EV)의 보급 등으로 인해 앞으로 전력시장의 수요 가격탄력도가 커질 것으로 예상된다. 주택에서의 전력수요는 다른 제품시장에 비해 아주 낮은 가격탄력성을 보이는 것으로 분석되고 있다. 가격의 변동에 비해 민감도가 낮아 수요량의 변화 폭이 작은 것을 의미한다. 주택용 전력수요에 비해 생산시설 및 사업에 소요되는 사업자용 전력은 그 가격탄력도가 높은 것으로 나타난다. 따라서 수요반응 변동요금제에 보다 민감하게 반응하여 변동가격 모형에 다소 유연하다. 에어컨과 같은 냉난방 전력기기의 사용은 전체 전력수요량에 커다란 비중을 차지하고 있으며, 이러한 전력기기는 그 사용 즉 전력소비를 이전(shiftable) 또는 지연할 수 있는 특성을 가진다. 이에 반하여 높은 가격에도 계속 사용해야 하는 기본적인 가전제품들이 있음에 따라 사용자의 최소 전력소비량이 존재한다. 또한 보유한 전력기기의 부하량에 따른 최대 전력소비량의 제약도 가지고 있다.

실시간 가격정보의 공유가 가능해지고 소비자들이 실시간으로 가격을 확인함으로써 최대 전력소비에 심리적인 변화를 유발한다. 가격의 오르고 내리는 데 따라 전력소비를 조절함으로써 최소/최대 제약의 변화가 발생한다. 마케팅 분야에서는 이와 같은 소비자 심리를 반영하는 모형들에 관한 기존 연구들이 있으며, 소비자의 구매에 영향을 미치는 가치판단의 문제와 가격과의 상관관계를 설명하기도 한다. 예를 들어 전력의 가격이 많이 떨어진다면 평상시 보다 많은 전력을 사용할 수도 있다는 심리적인 효과가 작용할 것이다[문용마, 2014].





## 2. 개별 제시가격( $p_n^t$ ) 함수

제 3장에서 살펴본 GECS, TECS 모형에서 소비자의 비용부담을 최소화하는 최적화 전략을 제시하는 가격함수를 ‘에너지 소비 스케줄링(ECS; Energy Consumption Scheduling)’ 이라고 명명하고 있다. 이 명칭은 미래 스마트 전력망의 전력사용 환경변화에 기인한 것으로, 사용자는 전력소비 전에 자신에게 제시되는 전력단가를 확인하는 과정을 의미한다. 즉, 전력사용 예약시스템이라도 말할 수 있다.  $n$ 번째의 개별 사용자가 전력기기를 작동하기 전에 쌍방향 전력 스케줄링 단말(smart devices)을 통해 전력 예정요금을 확인하고 구매 예약하는 것을 의미한다. 이때 제시받은 예정가격에 기초하여 사용자가 수용할 것인지 혹은 거부할 것인지 선택하고, 이 과정을 통해 가격조절 기능에 의한 전력수요의 분산이 이루어진다. 전력사용량의 급증에 관한 메시지와 함께 제시되는 높은 가격은 소비자의 작업을 연기하거나 취소하게 함으로써 전체 전력수요를 조절하고, 평균 전력사용량 근처로 전력피크를 떨어뜨려 전력생산가능 설비용량의 추가 없이 효율적인 전력망 운영을 가능케 하는 것이다.

수요반응 가격함수에 의해 제시되는 가격은 전력부하량을 분산시킬 만큼 적절한 수준으로 책정되어야 한다. 만일 가격이 너무 낮게 책정된다면 피크분산 기능을 수행하지 못할 것이며, 반대로 너무 높은 가격은 전체 전력시장의 비용을 과도하게 증가시켜 전체 전력시장의 공급과 수요 상의 비효율을 초래할 것이다. 후자의 경우 전체 전력사용량은 현저히 줄겠지만 사용자와 시장전체가 부담해야 하는 비용과 불편은 급격히 늘어나게 되고, 이로 인해 전체 시장구성원의 불편과 전력을 원가로 반영하는 일반 제품시장의 가격왜곡을 초래한다. 반대로 너무 낮은 가격이 산출된다면 애초에 목표하였던 전력수요 조절기능을 상실함으로써 전체 전력망의 기능상실(즉 블랙아웃)을 초래할 수도 있다. 이 두 경우 모두 가격의 왜곡 또는 기능의 상실로 전력망의 실패를 의미한다. 따라서 전력피크 분산이라는 기능을 극대화할 수 있는(PAR의 최소화) 가격함수식을 위한 몇몇 연구가 진행되고 있음은 앞서 살펴본 것과 같다.

본 연구에서는 기존의 연구와 다르게 전력소비자 개인의 가격탄력도를 가격함수에 반영하였다. 부하량에 따른 가격변동과 함께 개인의 가격탄력도를 반영함으로써 맞춤형 실시간 변동가격을 산출하기에 용이한 모형으로, 전력수요 조절에 적극적으로 참여하는 소비자와 그렇지 않는 소비자 간 차별화와 인센티브의 의미를 지닌다. 또한 예측되는 부하량 변화를 반영하는 기준가격으로 기온·시간대와 같은 외부환경 변화를 반영할 수 있도록 하였다. 이것은 전체 부하량 증감 예측치를 가격에 선 반영함으로써 한층 강화된 수요반응을 이끌어내기 위함이다. 만약 에너지 소비량이 증가하는 추세에 있다면, 그 가격을 올려 수요를 적절한 수준만큼 조절하고, 반대로 소비량이 감소하는 경우 인센티브로 작용함으로써 전체 전력피크를 분산하게 된다. 이 외에도 전력생산의 변화에 따른 원가변동을 포함시켜 전력공급자의 수익증감을 반영할 수 있도록 하였다. 수익증감에는 전력공급자의 예상 생산원가(변동/고정비용)에 추구 이익을 합한 회계적 개념이다.

전력수요 분산을 위한 새로운 가격을 산출하기 위한 EECS 가격함수식은 제시가격과 기준가격의 두 부분으로 구성하였다. 전체 시장의 전력가격에서 해당 사용자의 가격을 산출하는 ‘제시가격’ 계산과, 사용자에게 예약(스케줄링) 기능을 통해 제시되는 가격을 산출함에 있어 사전 데이터에 기초하여 해당사용자의 가격산정에 기초가 되는 ‘기준가격’ 부분이다. 다시 말하면 기준가격을 독립변수로 하고 이 외 독립변수인 개별부하량과 가격탄력도를 독립변수로 하는 함수로 표현된다. 본 절에서는 제시가격에 대해 서술하고, 기준가격은 다음 절에서 상세히 살펴보기로 한다.

제시가격( $p_n^t$ )은 스케줄링 시스템을 통해 전력을 구매하고자 하는 참여자에게 개별적으로 다르게 제시되는 예정 전력가격이다. 제시가격은 수식(7)에서 나타낸 것처럼 전체시장가격에 전체 전력비용(부하량×단가)에 대한 해당 사용자(즉, 추가 부하를 요구하는 사용자)가 차지하는 비용의 차지부분에 대한 가격을 산출한다. 이 때 전체시장가격 또한 직전 시점에 가격함수에 의해 계산된 가격이다. 예를 들어 전체시장비용을 100이라 하고 해당 사용자의 사용량이 1이라고 한다면 이 비는 1/100이 되고 전체전력시장의 가격이 1,000만원이라고 한다면 해당 사용

자의 기초가격은 10만원이 될 것이다.

전체사용자와 해당사용자의 가격탄력도 비를 앞서 산출한 개별 부하량에 따른 가격부분에 곱하여 개별 제시가격을 산출한다. 가격탄력도 계산에 대해 살펴보면, 매시간 변하는 보다 역동적인 가격변동과 그에 따른 수요량의 변화를 반영하기 위해 헤도닉기법을 적용하였다. 헤도닉기법을 이용하여 가격변화량( $P_t - P_{t-1}$ )을 도출하고, 이를 부하량 즉, 전력수요량에 나눈 개념인 가격탄력도를 계산함으로써 전체 제시될 가격( $p_n^t$ )을 산출하였다. 이 때 제시가격은 해당 참여자에게 제시될 Wh 당 전력단가를 의미한다. 이 단가에 부하량을 곱하여 해당 참여자가 부담해야할 전력가격이 계산됨을 의미한다. 이 가격은 개인별로 계산되어, 동일 부하량을 스케줄링하는 경우에도 참여자에 따라 다르게 제시된다. 다르게 제시된 가격은 개인의 가격탄력도에 따라 수용여부를 선택함으로써 부하량 조절의 기능을 수행하게 된다. 개별 가격탄력도를 독립변수로 한 단위당 제시가격( $p_n^t$ )에 관한 함수를 수식으로 나타내면 수식(7)과 같다.



$$p_n^t = P^{t-1} \times \left( 1 + \frac{C_h(l_n^t)}{\sum_{m \in N} C_h(L_t^m)} \times \frac{\eta_m}{\eta_n} \right) \quad (7)$$

$p_n^t$ : 사용자 n의 특정 시간대 t에서의 제시가격

$P^{t-1}$ : t-1 시간 대 전체 기준가격

$l_n^t$ : 사용자 n이 시간대 t에 사용할 부하량

$L_m^t$ : 전체 사용자의 직전 시간대에 사용한 전력량

$\eta_n$ : 사용자 n의 가격탄력도

$\eta_m$ : 전체참여자의 가격탄력도

기준가격 즉  $P^{t-1}$ 에 관해서는 다음 절에서 자세히 다루기로 하고, 비용함수에 대해 살펴보면 부하량에 대한 비용함수는 부하량과 단위가격(비용)의 곱으로 이

루어진다. 개별사용자는 여러 개의 각각 다른 전력부하량을 가지는 전력기기에 대한 전력소비 스케줄링을 수행한다. 이 전력기기는 전력소비 스케줄링 시 각기 다른 단위가격을 적용받을 것이다. 또한 냉장고와 같이 항상 작동되어야하는 전력기기와 에어컨, 세탁기처럼 그 전력사용 시간을 연기할 수 있는 부하량이 존재한다. 따라서 수요반응 가격제도의 핵심은 시간 이동이 가능한 전력부하에 집중될 것이다. 그러나 기업의 생산설비 또는 상업용 부하량의 경우 탄력도와 관련하여 그 양적 규모에 비해 스케줄링 예측이 쉽지 않은 문제가 있으나, 과거 일정기간의 히스토리 데이터를 사용하여 계산이 가능하다. 본 연구에서는 기업 또는 상업용 사용자는 분석대상에서 제외하였다. 기존 연구 또한 이와 동일한 가정을 적용하고 있다.

가격탄력도인  $\eta_n$ 과  $\eta_m$ 은 사용자  $n$ 과 전체시장  $m$ 의 가격탄력도를 의미하며, 그 비율은 1이상의 값을 가진다. 시장전체 가격탄력도를 개별 가격탄력도로 나누어 가격함수에 해당 소비자의 가격에 대한 태도지수화 하여 포함함으로써 과거 데이터를 활용하였다. 개별 가격탄력도의 전체 합은 전체 가격탄력도와 같으므로 다음과 같다. 이는 기준가격( $P^t$ )이 과거의 가격을 그대로 사용할 수 없는 이유기도 하다. 왜냐하면 전체시장으로 가격함수를 사용하면 과거가격이 제시가격과 같아지는 오류가 발생하기 때문이다. 이는 새로운 제시가격을 도출하는 가격함수로서의 기능을 구현하지 못하게 된다.

$$\eta_m = \sum_{n \in N} \eta_n \quad (8)$$

만약 사용자  $n$ 의 가격탄력도가 전체의 가격탄력도 보다 낮을 경우 1보다 큰 비율이 반영되어, 높은 제시가격( $p_n^t$ )가 계산된다. 이것은 가격과 상관없이 자신의 전력소비를 유지하고자 하는 참여자에게 보다 높은 제시가격을 적용하는 결과로 이어져 적극적으로 참여하는 선의의 참여자에 비해 그 부담을 가중시키는 알고리즘으로 작동한다. 만약  $n$ 의 가격탄력도가 전체의 가격탄력도 보다 높을 경우에는 낮은 제시가격이 산출된다. 따라서 가격탄력도가 높은 참여자에게는 낮은 전

력가격을, 높은 참여자에게는 낮은 전력가격을 제시함으로써 페널티 혹은 인센티브로 볼 수 있다. 이 때 적용되는 가격탄력도는 시간의 경과에 따라 변한다. 따라서 시장 전체 가격탄력도와 개별 가격탄력도를 주기적으로 반영하는 것이 필요하다. 그러나 본 연구에서는 전체 가격탄력도는 기존 연구에서 분석된 실제 값을 고정하여 사용하였고, 개별 가격탄력도는 매번 다시 계산하도록 하였다. 향후 스마트 전력망의 도입과 스마트 플레이스의 구축은 전체 사용자 가격탄력도와 개별탄력도에 대한 정확한 계산을 가능케 할 것이다.

제시가격( $p_n^t$ ) 함수는 직전에 적용된 기준가격( $P^{t-1}$ )과 예약희망 부하량, 그리고 과거의 구매 패턴에 근거한 전체/개별 가격탄력도를 독립변수로 하는 가격반응함수이다. 또한 이 제시가격은 향후 적용될 예정가격으로 참여자가 이 가격을 수용할 때 확정가격이 되어, 소비 부하량에 곱함으로써 참여자가 부담하는 실제 전력가격이 되는 것이다. 따라서 일정기간에 대한 전력가격 혹은 전력비용은 매 시점에 적용되는 전력단가(제시가격)에 해당 부하량을 곱한 시점 별 전력가격의 합이 된다.



### 3. 기준가격( $P^t$ ) 함수

가격함수는 개별 참여자의 요구 부하량에 대해 차별화된 가격을 산출하는 방정식이다. 이때  $t$ 시점에 모든 참여자에게 동일하게 적용되어 가격함수에 반영하기 위한 단위당 전력가격( $P^t$ )을 ‘기준가격’이라고 부르기로 한다. EECS에서는 부하량의 증감과 피크조절을 위해서는 기존의 기준가격을 그대로 적용하지 않고 다양한 변수를 반영하여 새롭게 계산하였다. 가격함수에 의해 직전 시간대의 기준가격( $P^{t-1}$ )의 기존 값에 개별사용자의 부분을 곱하는 방식은 실제상황을 반영하지 못한다. 왜냐하면 개별사용자의 특정 시간대  $t$ 에 대한 가격과 전체시장의 전력가격은 동시에 계산되는 것이 분명하다. 또한 2절에서 설명한 것처럼 전체전력시장에 대해 TECS의 모형에서는 전력생산비용에 일정 수익률을 곱하여 기준가격을 계산하고 있다. 그러나 수익비율은 2장에서 살펴본 것과 같이 부하량의 분산이라는 목적에 적합하지 않은 측면이 있으며, 부하량의 분산에 따라 기대수익률은 다시 영향을 받을 수밖에 없다. 따라서 단순한 기대수익률에 의한 기준가격의 계산이 아닌 다양한 요인을 반영하는 기준가격에 관한 함수식이 필요하다. 이러한 문제의 해결을 위해 EECS는 기존 연구에서 사용했던  $P^t$ 의 재조정을 위해 헤도닉 기법을 활용하였다.

헤도닉 기법은 가격의 회귀분석으로부터 측정하여 시간 개념을 포함하는 가격변화를 도출할 수 있는 접근방법이다. 회귀분석의 계수(coefficient)는 상품의 특성 가치변화를 추정하는데 유용하다. 각 상품의 특성이 다양한 조합으로 나타나는 복합 재화에 대해 각각의 특성을 분리해서 가격을 매김으로써 산출단위를 정의한다. 이런 의미에서 헤도닉 가격측정을 ‘특성가격측정’이라 할 수 있으며, 헤도닉 가격 이론을 ‘특성가격이론’으로 볼 수 있다. 일반적 헤도닉함수는 나타내면 다음과 같다.  $i$ 는 관찰된 표본을,  $Y$ 는 종속변수(가격),  $X_1, X_2$ 는 독립변수로 관찰 가능한 속성을 의미하며,  $\beta_1, \beta_2$ 는 독립변수  $X_1, X_2$ 의 계수로 회귀를 통해 추정하는 모수,  $\epsilon_i$ 는 오차항을 의미한다[이용만, 2008].

$$Y_i = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} + \epsilon_i \quad (9)$$

다분히 목적적이고 정책적인 수요반응 가격을 결정함에 있어 즉, 기준가격( $P_i$ )을 설정함에 있어 직전 기준가격( $\alpha$ ), 비용수익증감( $X_1$ ), 초과부하 위험( $X_2$ )를 독립변수로 포함하였다. EECS 모형은 기존 시장가격이 아닌 전력생산 유보량과 추가 전력생산에 따라 큰 폭으로 증대되는 생산원가 구조를 반영할 수 있도록 독립변수를 포함시켜 아래 수식(10)과 같이 설정하였다.

$$P^t = \alpha + \beta_1 X_{1i} + \beta_2 X_{2i} \quad (10)$$

$\alpha$  : 직전 기준가격( $P^{t-1}$ )

$X_1$  : 비용수익증감

$X_2$  : 초과부하 위험

직전 기준가격은 t-1의 가격함수에 의한 제시가격( $P_n^t$ )과 부하량의 곱으로 계산하며, 이미 계산되어 존재하는 값이다. 비용수익증감은 부하량 증가에 따른 전력생산원가에 일정 수익(제 2장 5절의 적정투자보수를 포함한)을 더한 금액이다. 만약 부하량이 증가한다면 증가분에 대한 생산원가와 수익이 더해진 만큼 (+)로 반영되고, 부하량이 감소하는 경우에는 (-)값을 가진다. 일반적인 상황 하에서 비용수익증감의 회귀계수  $\beta_1$ 는 1.0의 값으로 반영된다. 왜냐하면 원가반영 독립변수인  $X_1$ 은 제 2장에서 살펴본 것과 같이 우리나라의 경우 법령에 의해 강제되고 있어, 전력 생산과 공급을 위해 투입된 적정 원가와 이에 대한 요금기저 및 적정 투보율로 구성되기 때문이다.

마지막으로 계절, 요일, 기간, 외부온도 등 외부환경에 따른 부하량 예측과 이에 따른 전력망운영 위험에 대한 평가를 초과부하위험으로 반영하였다. 전력망의 운영을 통해 누적된 부하량변화 패턴에 기초하여 부하량 증가가 예측되면 (+)로 반영되고, 부하량 감소 또는 평균부하량 이하의 안정적 수급상황에서는 (-)값을

가진다. 이것은 전력부하량이 피크 근처에 있는 경우에는 위험에 대한 방어로 보다 높은 가격으로, 전력수급이 안정적인 경우에는 인센티브로 작용함으로써 평균 부하량 아래의 상황에서 전력 구매를 유도하여 전력피크 분산에 기여할 수 있다. 즉, 가격이 낮게 제시되는 시간대로 참여자의 전력구매를 유도하여 부하량이 증가할 수 있는 것이다. 이를 정리하면 아래 수식(11)과 같다.

$$P^{t-1} = \sum_{n=1}^N (p_n^{t-1} \times l_n^{t-1})$$

$$X_1 = \gamma \times C \left( \sum_{n=1}^N l_n^t - l_n^{t-1} \right) \quad (11)$$

독립변수가 두 개인 중다회귀모형의 전형인 수식(6)에 대해 살펴보면,  $P^{t-1}$ 는 기준가격의 절편을 의미하며, 회귀계수  $\beta_1$ 은  $X_2$ 를 고정시킨 상태에서  $X_1$ 의 값에 변화에 따른 회귀식의 기울기를 의미한다. 즉  $\beta_1$ 은  $X_1$ 이  $P^t$ 에 미치는 독립적인 효과를 반영하는 것이다.





## 제 5장 분석

본 장에서는 탄력도기반 에너지소비 스케줄링(EECS) 모형과 신뢰도기반 에너지소비 스케줄링(TECS) 모형에 대해 검증하였다. MATLAB 7.8.0 R2009a를 이용하여 전력시장 수요반응 가격 메커니즘을 전제로 전력부하량과 전력부하에 따른 가격에 대해 시뮬레이션을 수행함으로써 두 가격함수의 효율성에 대해 평가하였다. 모형의 평가는 게임이론기반 에너지소비 스케줄링(GECS) 모형과 TECS모형에서 공통적으로 모형의 효율성을 평가하는 지표로 사용된 PAR(Peak-to- Average Ratio)와 총 전력가격(total energy price)을 비교하였다.

우선 전력피크-평균 비율(PAR)은 평균 사용전력량 대비 최대 전력수요치인 피크사용량의 비율로, 스마트 전력망 체계에서 변경가격으로 피크전력량을 분산시킨 정도를 의미한다. 따라서 PAR값이 작은 모형이 보다 효율적인 것으로 해석된다. 즉, 전력피크 사용량과 평균사용량의 차이를 최소화함으로써 전력생산에 따른 투자를 최소화하고 전력사용 분산을 통해 보다 효율적 전력사용을 구현하는 것이다. 모든 참여자가 부담한 전력가격의 합계인 부하량에 제시단가를 곱하여 계산된다. 총 전력가격은 전체 전력시장의 비용을 의미하며, 이를 최소화하는 것이 시장 전체의 효율이 높음을 의미한다.

EECS와 TECS를 비교분석한 결과, 부하량과 총 전력가격에서 TECS가 높은 것으로 분석되었다. 우선 부하량 분석에서 EECS가 TECS에 비해 전력피크 분산효과가 크며, 이것은 전체 전력망의 안정성을 높이는 것으로 해석된다. 전력피크 시간대의 부하량 절감으로 인해 두 모형의 PAR 값 비교에서도 EECS가 낮은 수치를 나타내었다.

## 1. 시나리오

총 100명의 사용자를 가정하고, 총 3차례(시점  $t-1/t/t+1$ ) 부하량을 난수표로 생성하여 4장에서 제시된 제시가격 함수에 따라 각기 다른 가격을 계산하였다. 시뮬레이션은 2가지 시나리오에 기초하여 실시하였다. 첫 번째 시나리오는 시뮬레이션을 위한 가정으로 평균 0.1의 가격탄력도를 가지는 100명의 사용자가 여러 전력기기를 사용할 때, 그 중 40%만이 전력부하량 이전 가능(shiftable)한 것으로 가정하였다. 또한 최초에 적용하는 전체 가격탄력도와 단위 전력가격은 기존 연구에서 조사된 수치 0.09를 적용하였다. 또한 부하량은 참여자가 가지고 있는 전력기기의 종류와 소비전력을 고려하여 최소 5Wh에서 150Wh로 하였고, 최초에 적용되는 기준가격은 제 2장 표2-4에서 정리된 바와 같이 우리나라의 현재 가정용 누진 전력가격의 1단계인 67.8원으로 하였다.  $t$  시점에는 부하량이 피크로 증가하여 2단계 누진요금 단가인 103.75원을,  $t+1$  시점에는 다시 67.8원으로 적용하였다. 이 전력단가는 100Wh인 경우의 가격에서 200Wh 가격으로, 다시 100Wh의 가격으로 환원하여 적용한 단가이다.

두 번째 시나리오에서는 기준가격함수에 의한 새로운 기준가격을 적용함으로써 수요반응 가격의 효과를 극대화하였다. 보다 강화된 기준가격을 우해 수식(10)에서 공급가능위험 회귀계수( $\beta_2$ )를 0.2로 설정하여  $t+1$ 시점의 개별 제시가격을 다시 산출하고 이 가격에 대한 수용/거부를 시뮬레이션 하였다. 이에 대한 결과를 첫 번째 시나리오에서 도출된 결과와 비교함으로써 헤도닉기법에 의한 기준가격함수의 효용성을 검증하였다. 1,2차 시뮬레이션의 시나리오는 아래 표5-1과 같다.

표5-1 시뮬레이션 시나리오

구 분		설 정 값
1 차 시나리오	참여자 수	N=100
	사용자 개별 가격탄력도	평균 0.1, 표준편차 1.0
	사용자 전체 가격탄력도	0.09
	이전 가능 부하량(전력기기)	40%
	사용자별 최소/최대 전력량	5/150 Wh
	기준 시간/가격변동 주기	24h, 8h×3회
	t-1 시점 적용 단가	67.8원 (가정용 누진요금 100Wh 기준)
	t 시점 적용 단가	103.75원 (가정용 누진요금 200Wh 기준)
2 차 시나리오	$\beta_2$	0.2

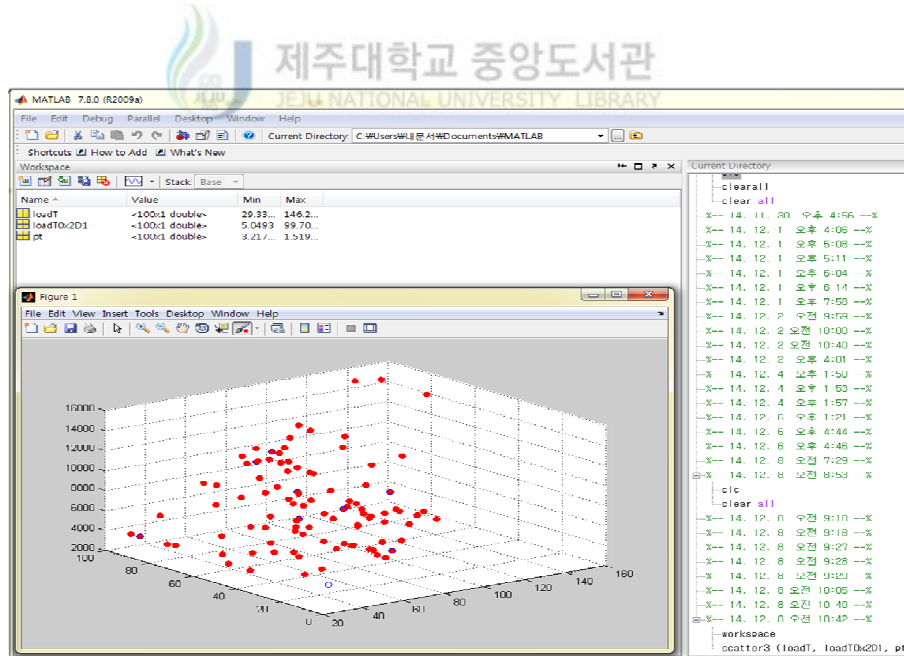


그림5-1 부하량 변화 및 제시가격(MATLAB R2009a)

```

double  $\eta_n$  = Math.random();
double  $l_n^{t-1}$  = Math.random();
double  $l_n^t$  = Math.random();

//1st. peak
double  $p_n^t$  =  $P^t * l_n^t$ ;
double  $\eta_n^t$  =  $(l_n^t - l_n^{t-1}) / (p_n^t - P^t)$ ;

if(en > e){
    System.out.println("reject");
     $l_n^t$  =  $l_n^t * 0.6$ ;
}else{
    System.out.println("accept");
     $l_n^t$  =  $l_n^t$ ;
}

//2nd. get down
 $p_n^{t+1}$  =  $P^{t+1} * l_n^{t+1}$ ;
 $\eta_n^{t+1}$  =  $(l_n^{t+1} - l_n^t) / (p_n^{t+1} - p_n^t)$ ;
if(en > e){
    System.out.println("reject");
     $l_n^{t+1}$  =  $l_n^{t+1} * 0.6$ ;
}else{
    System.out.println("accept");
     $l_n^{t+1}$  =  $l_n^{t+1}$ ;
}

System.out.println("total price:");
System.out.println("total load:");

```

## 2. EECS 분석

가격탄력도에 있어 전체 전력시장의 가격탄력도는 2005년부터 2009년 사이 전 자식 전력량계 계량데이터를 이용하여, 시계열 분석과 횡단면 분석을 통해 산출 한  $-0.09$ 을 사용하였다[정준환 외, 2012]. 이는 주택용, 일반용, 산업용 전력을 포 함한 실제 데이터에 기초하여 도출된 값으로 EECS에서 전체 전력수요의 가격탄 력도의 값으로 적용하였다. 개별 가격탄력도의 평균은  $-0.1$ , 표준편차는  $1.0$ 인 정 규분포로 하였다. 총 100명의 사용자에게 대해 전력수요급증의 경우에 대해 시뮬레 이션 하였다.  $t-1$  시점의 전체 부하량  $5,372.8\text{Wh}$ 에서  $t$  시점에  $10,370.8\text{Wh}$ 로 약 2배 증가하였다가 다시  $t+1$  시점에  $5,011\text{Wh}$ 로 하락하는 경우로, 정상수준→피크 전력→정상수준으로 변화량이 변화하고 있다. 이 세 시점에 대해 참여자는 에너 지소비 스케줄링을 시도하고, 가격함수에 따라 각기 다른 가격을 제시받는다. 참 여자는 각기 다른 자신의 가격탄력도에 따라 제시가격을 수용하거나 거부할 수 있다. 이 때 시장참여자 100명의 부하량 변화는 그림5-2와 같다. 이는 참여자들 이 희망하는 부하량을 의미하며, 제시가격에 대해 수용/거부를 판단함에 따라 실 부하량은 조정을 거친 후 확정된 부하량에 제시된 전력단가를 곱하여 개별 전력 가격이 산출된다.

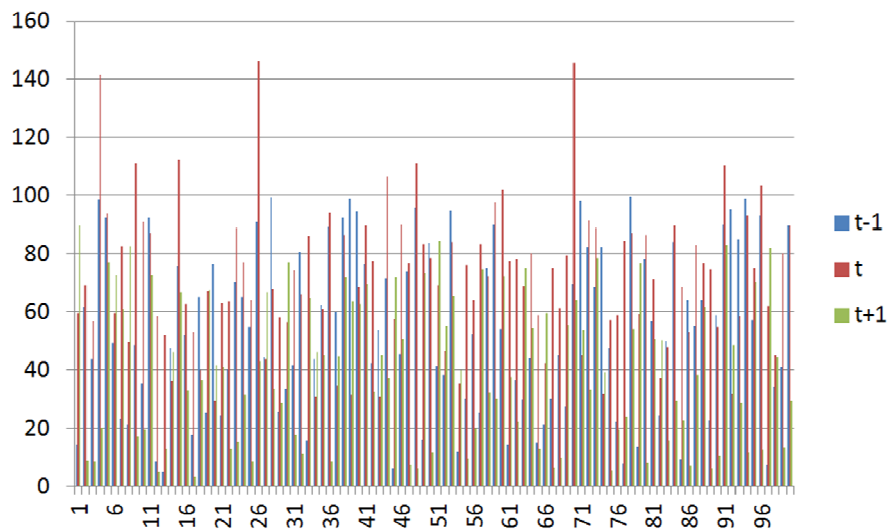


그림5-2 시간변화에 따른 참여자 요구부하량

(1) 1차 시나리오

첫 번째 시뮬레이션 결과 개별 가격탄력도에 따라 t시간대 제시가격을 수용한 28명은 원하는 부하량을 그대로 스케줄링 하였고, 나머지 72명은 제시가격을 거부하였다. 즉 72명은 가격이 너무 높다고 판단함으로써 추가 전력기기의 사용을 연기하였다. t시간대 스케줄링을 시도했던 부하량 대비 60%로 조정하였다. 이와 같은 가정은 아래 표5-2에서 나타낸 것처럼 냉장고와 같이 항상 가동되어야 하는 부하량에 에어컨, 청소기와 같이 선택가능 한 전력기기의 소비전력을 기준으로 계산된 값이다. 이전 가능한 전력기기의 대부분은 큰 소비전력을 가지고 있다. 예를 들어 에어컨을 가동하던 사용자가 추가로 다리미 한 개를 스케줄링하려고 하였다가 제시가격을 거부할 경우 다리미에 해당하는 1,200W 만큼의 부하가 줄어들 것이다. 다만 그 가동시간을 고려하여 최소 40%의 부하량으로 설정하였다.

표5-2 소비전력에 따른 부하량 계산

(단위 : Wh)

non-shiftable $l_n^t$		shiftable $l_n^t$	
냉장고	100	에어컨	1,300
김치냉장고	25	청소기	600
전등	500(50W×10개)	헤어드라이기	1,400
TV	120	전자라인지	1,100
컴퓨터&모니터	170	전기주전자	1,350
-		다리미	1,200
소 계	915	소 계	6,950

t 시점에서 전체 참여자는 인당 평균 71.1Wh의 전력을 구매함으로써 평균 7,589원에 달하는 비용을 부담하였으며, 제시가격을 수용한 28명은 9,857.6원의 평균 전력비용을 보였다.

표5-3 부하량 증가시 개별 제시가격( $p_n^t$ ) 통계치

평균	7588.776
표준 오차	244.9094
중앙값	7856.254
최빈값	#N/A
표준 편차	2449.094
분산	5998062
첨도	1.074907
왜도	0.548711
범위	11973.06
최소값	3217.16
최대값	15190.22
합	758877.6
관측수	100

EECS 가격함수에 의해 사용자 개인별로 산출된 Wh 당 제시가격( $p_n^t$ )을 제시함으로써, 자신의 가격탄력도에 따라 수용여부를 선택하도록 하였다. 참여자 각자에게 부하변화량에 기초하여 가치 다르게 제시된 Wh 당 전력단가는 직전 t-1 시간대에 제시가격에 비해 1.5배 높은 가격이 제시되었다. 이는 t-1 시간대에 비해 늘어난 부하량 증가에 따른 것이다. 자신의 가격탄력도를 기준으로 사용자는 전력부하의 취소 또는 연기한 72명의 평균 전력요금을 살펴보면, 인당 6,706원의 전력가격을 부담하였다. 이 가격은 제시가격을 수용한 28명보다 훨씬 적다. 시점 t-1에서 t로의 부하량 증가 시 개별 부하량( $l_t^m$ ) 및 전력가격( $p_n^t$ )의 그래프는 아래 그림5-3과 같다.

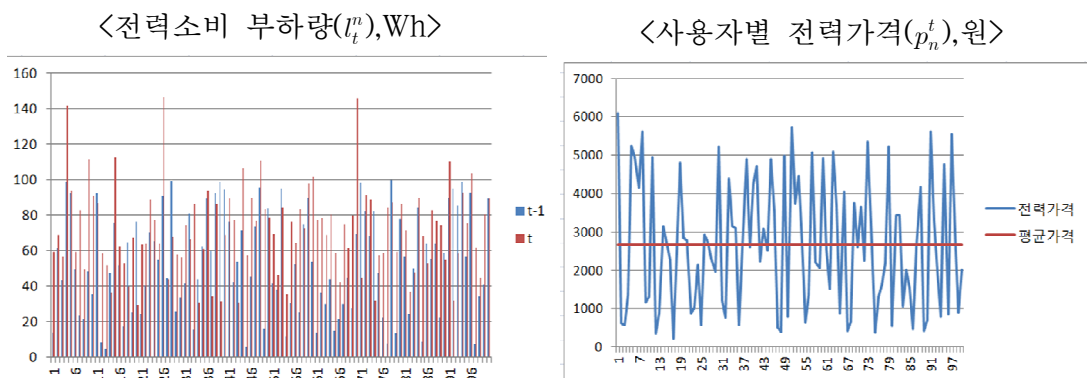


그림5-3 t시간 전력피크 부하량( $l_t^m$ ) 및 제시가격( $p_n^t$ ) 분포

그림에서 가로축은 1에서 100까지의 참여자를 의미하고, 부하량 그래프에서의 세로축은 Wh를 나타내었다. 제시가격인 전력가격의 그래프에는 참여자가 부담한 전력요금(원)을 표시하였다. 부하량 그래프에서 적색으로 표시한 t시점의 부하량은 t-1에 비해 증가하여 전력피크를 보이고 있다. 이에 따라 높은 단가가 EECS 가격함수로부터 계산되었다.

전력피크가 지나고 다시 전력사용량이 감소하는 경우에 대해 한 차례 더 시뮬레이션 한 결과, 전력소비 스케줄링 요청 부하량 감소에 따라 직전 시점(t)에 비해 5명의 참여자가 제시가격을 추가로 수용한 것으로 나타났다. 이 33명의 평균 부하량은 68.1Wh로 평균 전력요금 4,686원을 보였다. 이는 전체 참여자의 평균요금 2,658원에 비해 높은 금액이다. t+1 시점의 사용자 개별 부하량 및 전력가격의 그래프는 아래 그림5-4와 같다.

표5-4 부하량 감소시 개별 제시가격( $p_n^{t+1}$ ) 통계치



평균	2658.114
표준 오차	167.6682
중앙값	2568.295
최빈값	#N/A
표준 편차	1676.682
분산	2811263
첨도	-1.12256
왜도	0.294516
범위	5857.624
최소값	232.2226
최대값	6089.847
합	265811.4
관측수	100



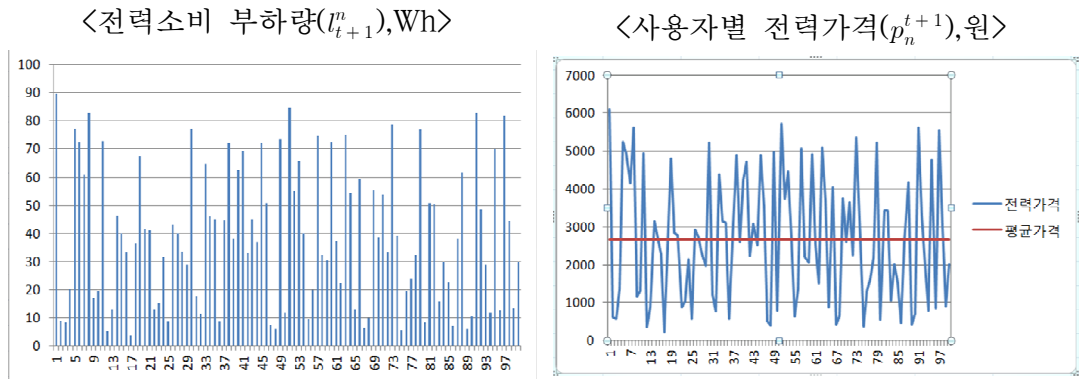


그림5-4 t+1시간 개별 부하량 및 전력가격

이상에서 살펴본 EECS모형은 최초 t-1 제시가격과 t, t+1에 걸쳐 각기 다른 가격을 산출하여, 개별 부하량에 따라 조정된 가격을 에너지소비 스케줄링에 제공하는 메커니즘을 구현하였다. 두 차례의 시뮬레이션에서 참여자 개별 제시가격은 67.8원에서 113.6원의 변동범위를 보여 167%에 달하는 가격범위를 보였다. 개별 부하량의 크기와 가격탄력도에 따라 제시가격을 산출하여 전력부하량을 분산시킴으로써 피크-평균 전력부하(PAR)를 낮추는데 성공하였다. t-1, t, t+1에 대해 각 참여자의 전력가격은 그림5-5에 도식화 하였다.

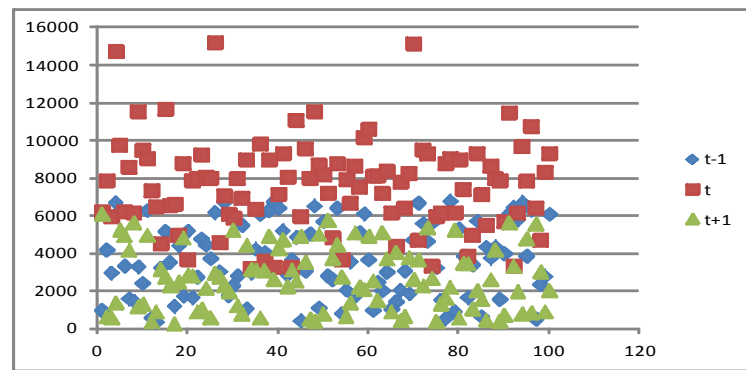


그림5-5 시간대 별 참여자 전력가격( $l_t^m \times p_n^t$ , 원)

전력 피크시간대인 t시점에는 높은 전력단가가 적용되어 6,000원에서 12,000원 사이의 높은 가격대 분포를 보이고, 다시 사용량이 줄어든 t+1 시간대에는 낮은 전력가격의 적용으로 1,000원에서 6,000원 사이에 집중된 분포를 보인다.

(2) 2차 시나리오

1차 시나리오에 이어 개별 제시가격의 산출 베이스로 산입되는 기준가격( $P^t$ )에 변화를 주어 부하량과 전력가격의 변화를 분석하였다. 기준가격은 모든 참여자에게 똑같이 적용되는 기준 전력단가로, 전력부하가 지속적으로 증가가 예상됨으로써 예비전력량에 위험이 예상되면 (+)값으로 기준가격 함수식에 반영되도록 하였다. 반대의 경우 시간, 기온 등의 외부환경에 의해 안정적 전력공급이 예상되면 (-)값으로 반영함으로써 전력부하를 유도할 수 있다. 2차 시나리오에 의한 시뮬레이션은 1차 시나리오와 동일한 참여자, 부하량 변화의 조건 하에서 기준가격을 조정함으로써 추가적으로 발생하는 변화를 살펴본다. 본 시뮬레이션에서는 기준가격의 계산에 있어 최소한의 조건을 구성하였다. 우선 비용수익증가 부하량 증감에 대한 회귀계수는 1.0으로 하고, 초과부하위험 회귀계수( $\beta_2$ )를 -0.2로 하여 시뮬레이션 하였다. EECS 가격모형의 초과부하 위험을 반영한 인센티브 시행에 따른 참여자별 전력가격은 그림5-6과 같다.

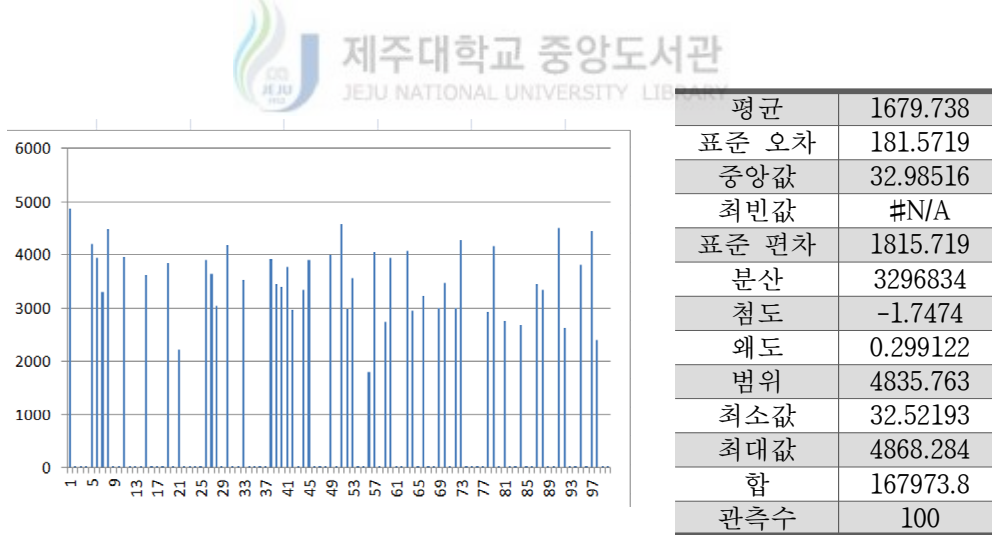


그림5-6 기준가격 조정 시 전력가격(원)

피크시간을 지나 다시 평균 부하량 아래로 안정적인 전력수급이 된 상황을 가정하고, 기준가격을 하락 재조정하였다. 이것은 여유 있는 전력수급에 대한 인센티브로 작용하여 참여자들의 전력부하를 유도하는 결과를 보였다. 총 100명의 참

여자 중 44명이 제시금액을 수용하여 1차 시나리오에 비해 11명이 늘어난 결과를 보였다. 특히 인당 평균전력가격을 비교하면 1차 시나리오의 4,686원에 비해 1,676원으로 대폭 절감되는 효과를 보였다.

EECS 모형 및 시뮬레이션에 대해 정리하면 다음과 같다.

첫째, EECS는 참여자가 스케줄링을 원하는 요구부하량에 따른 참여자 별 가격탄력도를 반영한 가격함수이다. 참여자에게 각기 다른 제시가격을 매번 산출·제시한다. 과거 데이터를 기초로 계산되는 가격탄력도는 개별 전력수요의 소비태도를 반영하고, 소비 패턴에 따른 차별화된 가격을 제시한다.

둘째, EECS 가격함수는 크게 개별참여자에게 다른 제시가격( $p_n^t$ )과 그 제시가격을 계산을 위한 해당 시점의 전체 기준가격( $P^t$ )으로 구성되었다. 제시가격은 기준가격에 개별 부하량비율과 가격탄력도를 반영하여 산출된다. 기준가격에 포함된 비용수익증감( $X_1$ ), 초과부하 위험( $X_2$ )을 통해 피크제어 또는 인센티브 가격제도를 구사할 수 있을 것이다.

셋째, 제시된 가격을 참여자가 수용 또는 거부하는 선택을 반영하였다. 에너지 소비 스케줄링을 원하는 요구부하량에 따른 제시가격을 확인하고 가격탄력도를 기준으로 수용 또는 거부를 선택하고, 거부한 경우 그 부하량을 분산함으로써 전력피크를 낮추는 역할을 수행한다.

넷째, 전력피크와 평균 부하량으로 복귀하는 경우에 대한 시뮬레이션을 통해 부하량의 변화와 가격변화를 살펴보고, 피크분산 효과와 참여자들의 전력비용에 대해 분석하였다. 이 결과는 다음 절에서 기존 연구와 비교분석함으로써 그 효용성을 검증한다.

### 3. EECS - TECS 비교

2절에서는 가격탄력도에 기반한 가격함수에 의한 전력부하량과 개별 제시가격에 관한 시뮬레이션과 그 결과에 대해 고찰하였다. 본 절에서는 신뢰도기반 에너지소비 스케줄링(TECS) 모형에 대해 동일한 조건으로 시뮬레이션하고 두 모형의 결과를 비교하였다. 두 모형의 결과를 기초로 PAR값과 총 전력가격을 비교분석함으로써 가격함수의 효용성에 관해 고찰하였다. 이 PAR와 총 전력가격은 GECS 모형에서 모형의 효용성을 검증하기 위해 사용한 지표로 TECS에서도 동일하게 사용되었다. 각기 다른 변수와 가정을 가진 두 모형의 비교를 위해 TECS에 대해 초기 적용가격은 Wh 당 67.8원으로 EECS와 동일하게 하였으며, TECS의 전체 전력시장의 신뢰도는 시간이 경과함에 따라 전력수요가 오르고 내리는 점을 감안하여 0.5로 가정하였다.

에너지비용은 전체 N명의 사용자의 시간대(h)별 전력부하에 따른 에너지비용함수는 다음과 같다. 개별 사용자 n은 a개의 전력기기를 사용함에 따른 시간당 비용  $c_h$ 의 하루 전체 사용시간 즉, 24시간에 대한 합으로 표현되는 총 전력비용의 최소화를 만족하는 가격함수가 효율적임을 의미한다. 부하량에 대한 비용함수  $C_h(L_h)$ 는 각 부하량에 전력기기의 수량을 곱하여 계산되며, 전력 소비자의 입장에서는 이 비용을 최소화하는 선택이 최선이다[Amir-Haned Moshenian-Rad et al., 2010]. 부하량에 대한 비용함수는 아래 수식(12)와 같이 계산되며, 전체 전력가격과 동일한 값을 가진다. 구매자가 부담하는 비용은 전력판매자의 입장에서는 가격이다.

$$C_h(L_h) = a_h L_h^2 + b_h L_h + c_h \quad (a_h > 0, b_h \text{와 } c_h \geq 0)$$

$$\underset{x_n \in X_n}{\text{minimize}} \sum_{h=1}^H C_h \left( \sum_{n \in N} \sum_{a \in A_n} x_{n,a}^h \right) \quad (12)$$

우선 TECS의 3차례에 걸친 부하량 변화에 따른 개별 사용자의 부하량 변화에 따라 ‘이전 사용량 즉, 부하량을 넘지 않는 비율, 즉 신뢰도’를 계산하고, 이를 4장에서 서술한 TECS 가격함수에 대입함으로써 t+1 시점에 대한 부하량과 전력 가격을 산출하였다. TECS에 의한 시뮬레이션 결과, 총 100명은 그림5-7과 같이 5,011Wh의 전력소비 스케줄링을 보였다. 인당 평균 50.1Wh 부하량에 평균비용 4,411원을 보였다.

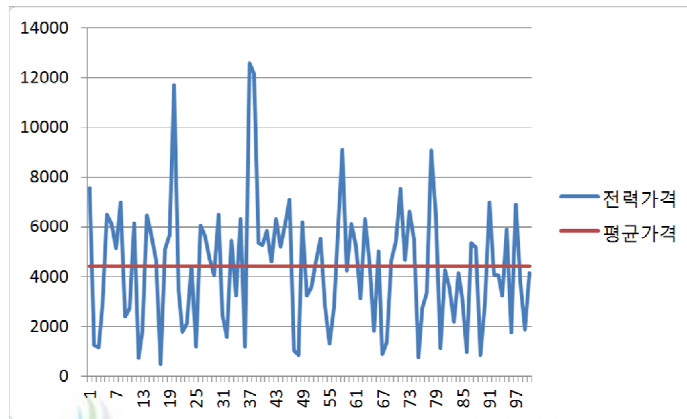


그림5-7 TECS모형의 개별 전력가격 및 평균가격(원)

이 결과를 EECS와 비교해 보면 총 부하량과 총 가격에서 증가한 것으로 분석되었다. 우선 부하량에서는 EECS가 TECS에 비해 전력피크 분산 효과가 큰 것으로 나타났다. 피크타임인 t시점에는 3,200Wh에 달하는 부하량 분산 효과를 나타내었다. 전체 사용자의 전력가격에서는 1,881,371원을 보인 TECS에 비해 1,278,749원을 보인 EECS가 602,622원을 절감하여 EECS가 보다 효과적인 것으로 분석되었다. 또한 두 모형의 가격함수에 의해 참여자에게 각기 다르게 제시되는 제시가격( $P_n^t$ )을 보면 EECS는 Wh 당 67.8원에서 113.6원의 다양한 개별분포를 보이는 반면, TECS는 신뢰도에 따른 단조로운 분포를 보여 EECS가 참여자의 가격탄력도를 고려한 가격함수의 부하량조절 기능이 유효한 것으로 나타났다. 그림 5-8에서는 EECS와 TECS의 개별 전력가격을 나타내었다. x축은 t 시점의 부하량, y축은 t+1 시점의 부하량을 z축은 전력가격을 표시하였다.

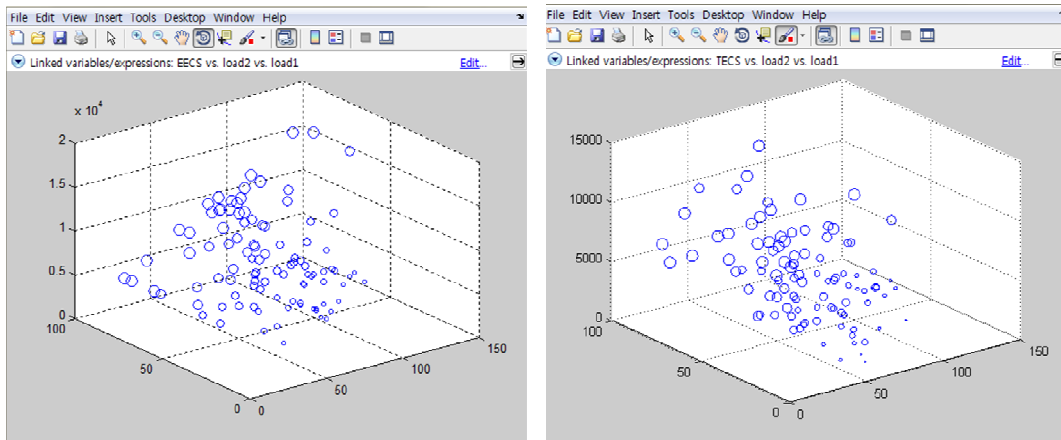


그림5-8 EECS(좌)와 TECS(우) 전력가격 분포

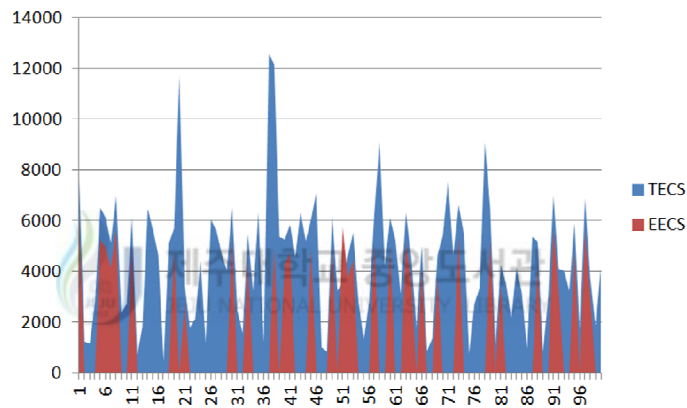


그림5-9 개별 전력가격(Wh) 비교

두 모형을 비교평가에 두 가지 평가지표를 채택하였다. 우선 피크타임 부하량 대비 평균부하량의 비율을 의미하는 PAR를 비교하여 EECS와 TECS의 피크분산의 효율성을 검증하였다. 피크부하량 비교에서 EECS가 평균부하량과 좁은 격차를 나타낸다. 이는 PAR 값을 의미한다. 아래 그림5-10은 평균전력부하와 시간흐름에 따른 부하량의 변화를 보여준다.

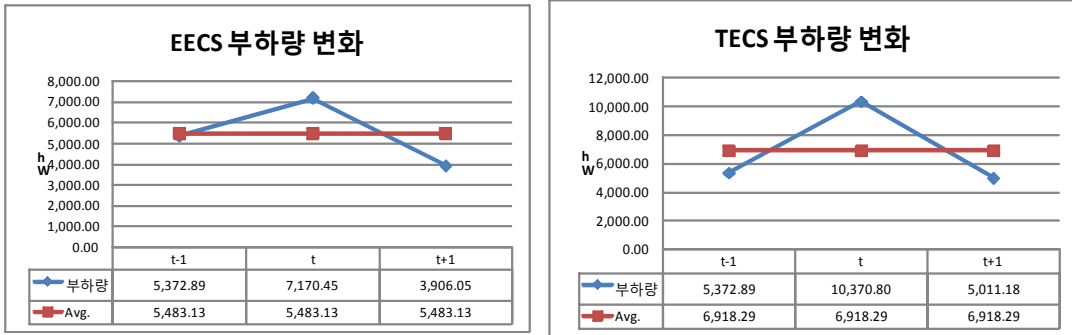


그림5-10 총 부하량 비교

비교평가지표 중 첫 번째 지표인 PAR에 대해 정리하면, 시간당 부하량을  $L_h$  라고 할 때 다음과 같이 표현된다. PAR는 전체 전력시장의 최대 전력사용량을 평균 사용량으로 나누어 계산된다. 최대 전력사용량은 개별 전력부하량의 전체 합이며, 평균 전력사용량은 총 전력수요를 사용시간으로 나눈 개념이다. 즉 1일의 평균사용량은 1일 총 전력 부하량을 24시간으로 나누어 계산된다[Amir-Haned Moshenian -Rad et al., 2010].



$$L_{peak} = \max_{h \in H} L_h \text{ and } L_{avg} = \frac{1}{H} \sum_{h \in H} L_h \text{ 일 때,}$$

$$\text{Minimize PAR} = \frac{L_{peak}}{L_{avg}} = \frac{H \max_{h \in H} L_h}{\sum_{h \in H} L_h} \quad (13)$$

앞서 두 차례 시뮬레이션에서 도출된 결과를 바탕으로 수식(13)를 기초하여 PAR값을 계산하면 EECS는 1.30으로 TECS모형의 1.499 보다 더 효율적인 것으로 분석되었다. 이는 EECS모형이 전력소비 평균값 5,483Wh와 전력피크 7,170Wh를 보여 그 차이가 크지 않음을 의미하며, 수식(13)와 같이 PAR값의 최소화를 만족시키는 EECS가 보다 우수한 것으로 해석되었다.

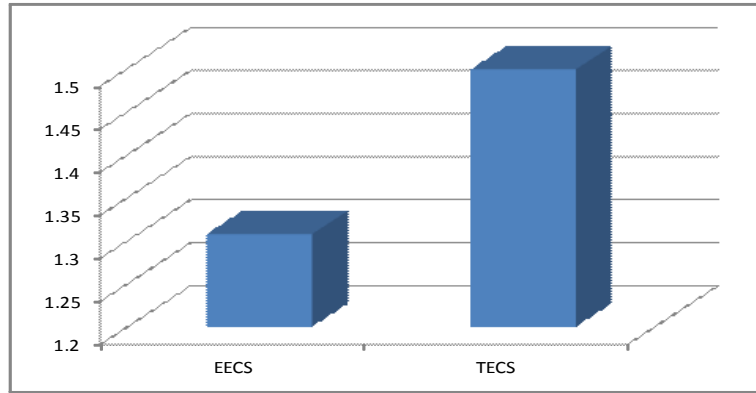


그림5-11 PAR값 비교

두 번째 평가지표인 총 전력가격은 개별부하량과 개별 제시단가를 곱한 개별 전력금액의 합으로 계산된다. 총 전력가격이 작다는 것은 전력소비자가 부담해야 하는 비용이 저렴한 것을 의미하여, 그 수치가 최소화 되는 모형이 우수한 것으로 평가된다. EECS와 TECS의 총 전력가격에 대한 비교에서 EECS는 1,388,970원으로 계산되어, TECS의 1,881,372원에 비해 47% 저렴한 것으로 분석되었다. 따라서 EECS가 우월한 것으로 평가되었다.

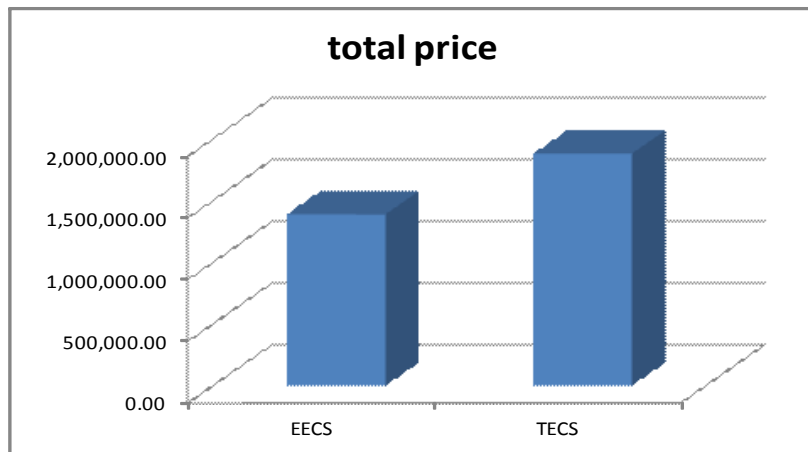


그림5-12 총 전력가격 비교



## 제 6장 결 론

수요반응 가격결정의 핵심은 최대전력수요(peak) 분산을 가능하게 하는 가격함수이다. 전력부하의 분산으로 Peak를 낮추는 스마트한 전력시스템에 도입될 새로운 가격산출은 실시간 전력수요를 반영하는 변동 가격모형을 의미한다.

현재 적용되고 있는 고정가격모형은 원가기준(Cost Based) 가격결정모형으로 전기의 생산·공급을 위하여 사용된 비용에 기초하고 있다. 그러나 가격조정을 통한 전력수요의 분산이라는 다분히 정책적인 목적과 매 시간 변하는 전력수요에 대응하지 못하는 문제를 가지고 있다. 기존의 연구들은 소비자의 행동양식과 가격에 대한 행동패턴 및 외부효과를 반영하지 못하거나, 스케줄링 입력 부하량 변화의 전력피크 분산을 위한 가격조절에 미흡하다. 기존 모형은 소비자들이 절대적인 가격만을 보고 판단하는 경우를 전제로 하고 있다. 소비자들의 구매 행동에 관한 여러 연구를 통해 소비자들은 절대적인 가치만으로 물건을 구매하지 않고, 기준가격(reservation price)과 본인이 생각하는 제품의 가격을 비교함으로써 그 차이가 + 이면 구매하고, - 이면 구매하지 않는다. 이와 유사하게 전력소비에 있어서도 가격함수에 의한 제시가격을 보고 합리적인 범위의 변동일 경우 소비량을 조절하게 된다. 따라서 전력사용에 대한 소비자의 행동패턴과 다양한 요인을 포함하는 새로운 모형이 필요하다.

본 연구는 기존의 가격결정이론과 가격모형 및 가격반응함수에 대한 고찰과 더불어 전력구매 선택을 포함한 가격탄력도 기반 스케줄링 기법(EECS)을 제안하였다. 이 모형은 실시간 에너지소비 스케줄링 정보에 대해 기준가격과 개별 가격탄력도에 기초한 시간대 별/사용자 별 차별화된 가격을 도출하는 가격함수를 채택하였다. 이 때 사용자의 가격탄력도가 낮을수록 보다 높은 제시가격이 산출됨으로써, 자신의 수용범위 내의 가격대를 선택하여 작업 시간대를 가격이 낮은 시간대로 재배치하거나 작업을 취소함으로써 전력수요 분산이라는 기능을 구현한다.

또한 원가요소와 초과부하(공급부족)위험을 반영한 기준가격을 위한 함수로 전력피크 분산을 위한 강화된 기제를 제시하였다. 가격함수는 수요반응 개별 제시가격을 위한 함수와 기준가격을 위한 가격함수로 구성된다. 기준가격은 원가기준의 비용수익증감과 공급가능위험평가의 변수로 구성되어 제시가격함수에 반영된다. 또한 시뮬레이션을 통해 신뢰도 기반 스케줄링 모형(TECS)와 가격함수에 의한 부하량과 제시가격을 산출하였고, 두 모형의 결과를 비교분석하였다. 비교분석을 위한 지표로는 전력피크 분산을 의미하는 PAR(Peak-to-Average Ratio)값과 전체 전력가격을 기준으로 비교하였다. 이 두 지표는 앞선 연구에서 공통적으로 사용되고 있는 지표로, 전력피크 분산 기여도와 전력소비자의 비용부담 절감 정도에 관한 지표이다. EECS와 TECS의 비교결과 이 두 지표 모두에서 EECS가 작은 것으로 나타나, 더 유용한 가격모형으로 평가되었다.

그러나, 가격탄력도를 사전에 결정함에 있어 전체 참여자의 가격탄력도는 실제 데이터에 근접한 수치를 사용하였으나, 개별 가격탄력도에 대한 실증연구 부족으로 실측 데이터를 활용하지 못한 한계가 있다. 향후 전력거래시장의 운영으로 시간대별, 부하량 별 히스토리 데이터 수집이 용이해진다면 가격함수에 적용할 여지가 있는 것이다. 더 나아가 전력거래시장의 활성화로 개인, 민간 발전사업의 전력공급이 가능해진다면 보다 복잡한 형태의 가격함수가 가능할 것이다. 예를 들어 풍력, 태양광과 같은 재생에너지를 통해 생산된 전력 또는 ESS에 저장된 전력을 시장에 공급하는 완전경쟁시장에 대한 추가 연구가 필요하다.

## - 참고문헌 -

- 강임호, 김진영, “주요정보통신제품의 헤도닉 가격측정,” 정보통신정책 연구원, pp.27-45, 2001. 12.
- 김수덕, 손양훈, “도매전력시장의 가격결정 과정에 대한 실증분석: 용량 요금 및 전산단가를 중심으로,” 에너지경제연구 제7권 제2호, pp.30-41, 2008. 12.
- 고상혁, 정범진, “원자력 및 신재생에너지 발전비율에 따른 전력단가의 변화,” 에너지공학 제15권 제1호, pp. 8-21, 2006.
- 김두섭, 강남준, “회귀분석,” 나남, pp.85-99, 2000.
- 김발호, “주택용 소비자에 대한 동적요금제도의 수요반응 영향 분석,” 대한전기학회 하계학술대회, pp.548-549, 2010.
- 김종덕, 김진오, “발전경쟁시장에서 기회비용을 고려한 예비력 가격결정,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1257-1258, 2006. 7.
- 문용마, “소비자 행동과 가격탄성을 고려한 스마트그리드 수요반응 실시간 가격 결정 모델,” 한국경영과학회지 제39권 제1호, pp.51-53, 2014. 3.
- 문준영, 신기태, 박진우, “스마트그리드 환경의 전력소매시장을 위한 최적의 실시간 가격결정 모형에 대한 연구,” 한국전자거래학회지 제 17권 제2호, pp.105-108, 2012. 5.
- 박광배, “변량분석과 회귀분석,” 학지사, pp.269-323, 1999.
- 박상준, 김승욱, “전력가격 신뢰도를 적용한 게임이론 기반의 스마트그리드 스케줄링 기법에 대한 연구,” 정보과학회 논문지 시스템 및 이론 제40권 제3호, pp.117-120, 2013. 6.
- 유필화 “가격정책론,” 박영사, pp.29-186, 1991.
- 이용만, “헤도닉 가격 모형에 대한 소고,” 부동산학연구 제14집 제1호, pp.81-87, 2008. 4.
- 이유수, “수요반응 전력가격제의 소비자 후생변화 분석,” 에너지경제연구

- 구원 기본연구보고서, pp.5-16, 2013.12.
- 이재봉, 윤용범, 구자열, 김수덕, “패널모형을 이용한 국내 전력수요의 가격탄력성 추정에 관한 연구,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.642-643, 2011. 7.
- 이정동, 김원준, 황석원, 안지운, “헤도닉 회귀분석을 이용한 품질 보정,” 통계분석연구 2002년 가을(제7권 제2호), pp.27-68, 2002.
- 이정우, 이세윤, “인터넷 콘텐츠 서비스에 있어서 가격반응함수의 추정에 관한 연구,” 한국전자거래학회지 제14권 제1호, pp.96-100, 2009. 2.
- 정준환, 이지연, “국내 수송용 석유제품 수요의 가격탄력도 변화 연구,” 에너지경제연구원 기본연구보고서, pp.15-21, 2012. 4.
- 정한경 외 “현행 전기요금의 적정성 분석,” 산업자원부, pp.7-11, 2004. 8.
- 최태섭, 고경록, 박성찬, 김형태, 윤용태, “스마트그리드 환경에서의 수용가 에너지 비용 최적화 전략 연구,” 대한전기학회 학술대회 논문집, pp.517-518, 2012.
- Alvadi, M. H., and E. F. El-Saadany, “A Summary of Demand Response in Electricity Market,” *Electric Power Systems Research* 78, 2008.
- Amir-Haned Moshenian-Rad, Vincent W. S. Wong, Juri Jatskevich, Robert Schober, and Alberto Leon-Garcia, “Autonomous Demand Side Management Based on Game-Theoretic Energy Consumption Scheduling for the Future Smart Grid,” *IEEE Transaction on Smart Grid*, vol.1, no.3, pp.320-331, 2010.
- Brundtland Report, *the United Nations World Commission on Environment and Development*, 1987
- Conejo, A. J., J. M. Morales, and L. Baringo, “Real-time demand response model,” *Smart Grid, IEEE Transaction on*, Vol.1, No.3, pp.236-242, 2010.
- C. Triki and A. Violi, “Dynamic pricing of electricity in retail market,” *Quarterly Journal of Operations Research*, vol.7, no.1,

pp.21-36, 2009. 3.

Halvorsen, R. and Palmquist, “The Interpretation of dummy variables in Semi logarithmic Regressions,” *American Economics Review*, Vol. 70, pp.474-475, 1980.

Hao, S. and A. PaPalexopoulos, “Reactive power pricing and management,” *Power Systems, IEEE Transactions on*, Vol.12, No.1, pp.1-7, 1997.

Lalit Mohan Saimi, and Mahender Kumar Soni, “Artificial neural network-based peak load forecasting using conjugate gradient methods,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.17, no.3, pp.907-912, 2002.

M. A. A. Pedrasa, T. D. Spooner, and I. F. MacGill, “Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization,” *IEEE Trans. on Power Systems*, vol.24, no.2, pp.1173-1181, 2009. 8.

Mohsenian-Rad, A. H. and A. Leon-Garcia, “Optimal residential load control with price prediction in real-time electricity pricing environments,” *IEEE Transaction on Smart Grid*, Vol.1, No.2, pp.120-133, 2010.

Nima Amjady, “Short-term hourly load forecasting using time-series modeling with peak load estimation capability,” *IEEE Trans. on Control Systems*, vol.16, no.4, pp.798-805, 2002.

Triplett, Jack E., “hedonic functions and hedonic indexes,” in J. Eatwell, M. Milgate and P. Newman ed., *The New Palgrave : A Dictionary of Economics*, pp.630-634, 1987.