

Modeling of Demand Side Bidding in Demand Resource Market using Game Theory

이 광 호* · 조 성 위†
(Kwang-Ho Lee · Sung-Wi Cho)

Abstract - Market price and curtailment amounts of the Demand Resource Market(DRM) are determined by competition between electricity consumers. An important aspect of the DRM involves the assessment of strategic behavior of participants for maximizing their profits. This paper presents economic equilibrium models for simulating imperfect competition among electricity consumers in the DRM and analyzes the models at Nash Equilibrium of Game Theory. The proposed demand functions and supply functions of DRM are based on the Demand Resource Market Rules in Korean electricity market. Simulation results show that the models are adequate for obtaining Nash Equilibrium of consumers' competitive curtailment.

Key Words : Electricity market, Demand resource market, Demand side bidding, Nash equilibrium, Game theory

1. 서 론

전력시장운영의 가장 큰 목적은 안정적인 전력공급을 수요자에게 보장하는 것이다. 전력수급안정을 위한 기존의 방식은 매년 예상되는 최대전력수요를 감안해서 발전설비를 확충하는 것이다. 이러한 예측 수요량에 맞춘 공급 측 설비 확장방식은 전력수요가 가지는 큰 편차특성 때문에 효율성 측면에서 문제점을 지니고 있다. 한 예로서 최근 5년간 국내 최대전력수요증가율은 연평균 5.5%인 약 400만kW이지만, 전년도 최대전력을 초과하는 시간은 연중 약 1% 정도에 불과하다[1]. 이러한 문제로 인해서 극히 짧은 기간 동안 발생하는 최대전력수요에 맞춰 발전설비를 확충하는 것 보다는 수요자의 전력사용패턴을 변화시킴으로써 안정적인 전력공급을 구현하고자 등장한 개념이 수요관리(Demand Side Management:DSM)이다.

수요관리의 효율성 인식에 따라 미국의 경우 연방에너지 규제위원회(FERC)와 각 주의 규제위원회의 지원을 받는 전력계통운영기관들이 시장원리에 기반을 둔 다양한 수요반응(Demand Response:DR)제도를 개발·도입하고 있으며, 현재 해외 선진국 전력시장을 중심으로 여러 DR제도가 활성화되어 시행되고 있다[2-3]. 국내에서는 지원금입찰제를 통해 수요반응을 유도하는 수요자원시장이 2008년에 도입되어, 2009년 하계에 36.4만kW 부하를 감축한 바 있다[4].

수요반응제도는 가격을 기반으로 하는 프로그램(Priced Based Programs:PBP)과 인센티브를 기반으로 하는 프로그램(Incentive-Based Programs:IBP)으로 분류된다[5]. PBP방식의 제도를 다룬 논문에서는 수요자원입찰자가 입찰을 통해 전력시장가격을 변화시킴으로써 자신의 한계효용을 극대화시키는 내용을 다룬 연구와[6], 수요반응자원이 전력가격과 수요반응참여자의 한계효용에 영향을 미치는 내용으로 연구가 진행된 바 있다[7,8]. 한편 IBP는 비시장기반의 프로그램과 시장기반의 프로그램으로 분류된다[5]. 직접부하제어나 비상정전제도는 비시장기반 프로그램에서의 인센티브에 포함되고, 보조서비스시장과 수요자원시장 등은 시장기반프로그램에서의 인센티브에 포함되며 입찰자간의 경쟁에 의해 인센티브가 결정된다[9,10].

수요자원시장은 전력수요자로부터 수요자원을 구매하여 효율적인 전력수요를 유도해내려는 전력시장운영자와 수요자원을 판매함으로써 이윤을 창출하려는 수요자원판매자들로 구성된다. 이때 수요자원시장가격은 시장원리에 따라 수요자간의 경쟁을 통해서 결정된다[9]. 따라서 수요자의 전략적 행동이 시장가격과 감축량에 미치는 영향이 크다. 그러므로 수요자의 입장에서 수요자의 경쟁적 입찰전략을 고려한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 수요자원시장에서의 입찰자간에 일어나는 입찰전략경쟁을 분석하기 위해서 입찰자들이 입찰함수를 통해서 경쟁하는 모형을 사용한다. 또한 전력수요 감축으로 인한 영향을 반영하기 위해 전력수요함수에서의 만족가치(Benefit) 개념을 사용한다. 수립한 모형에서 입찰자간 경쟁의 균형 상태가 갖는 특징분석을 통해 감축결과에 영향을 주는 파라미터를 분석하며, 이를 통해 입찰자간 상대적 감축

* 정 회 원 : 단국대 전자전기공학부 교수·공학박
† 교신저자, 준회원 : 단국대 전자전기공학과 공학석사
E-mail : sungwi221@gmail.com
접수일자 : 2010년 7월 29일
최종완료 : 2010년 10월 3일

의지를 확인한다.

2. 수요자원시장

2.1 수요자원의 의미

수요자원이란 전력소비자의 전력수요 감축을 자원으로 해석한 것이다. 따라서 전력소비자가 수요자원을 수요자원시장에 파는 것은 그만큼의 전력사용량 감소를 의미한다. 수요자원시장을 통한 수요자원의 거래는 전력소비자에게는 감축지원금을 통한 금전적인 수익을 가져오며, 시장운영자에게는 침투부하 감소를 통한 합리적인 수요관리를 가능하게 한다. 본 논문에서 수요자원 공급자는 전력소비자이며 구매자는 시장운영자이다. 또한 전력소비자의 감축량은 수요자원 판매량을 의미한다.

2.2 감축가격과 감축구매량 결정

시장운영자는 공급예비력의 부족이나 전력수요의 급증이 예상될 경우 수요자원시장을 개설한다. 수요자원시장이 개설되면 시장운영자는 미리 수립한 감축계획에 따라 전력소비자가 입찰한 수요자원 중에서 가격이 낮은 순으로 구매하여 목표한 감축량을 확보한다. 따라서 수요와 공급에 의해 최종적으로 결정되는 감축시장가격(Curtailment Market Price: CMP)보다 낮게 제시된 수요자원들만 판매가 결정된다 [9]. 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

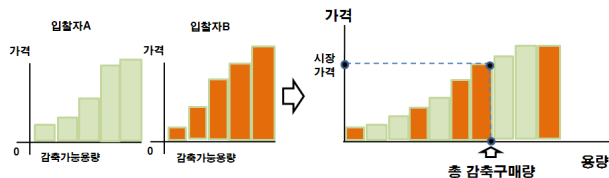


그림 1 감축시장가격 및 감축량결정

Fig. 1 Determination of Curtailment Market Price and Curtailment Amount

그림에서 좌측 그래프는 입찰자 A, B가 시장운영자에게 제시하는 감축가능용량 및 용량별 가격을 나타낸 것이고 우측 그래프는 그에 따라 결정된 시장가격 및 감축량 할당결과이다.

2.3. 공급자간 경쟁

수요자원시장의 가격은 모든 감축량에 대해 단일 가격으로 적용되며 수요자원판매자의 수익은 감축시장가격과 감축량의 곱으로 계산된다. 수요자원시장에서의 입찰경쟁 시 입찰가격을 낮게 제시한 입찰자가 감축량을 경쟁자보다 더 많이 확보하는 것을 그림 1을 통해서 알 수 있다. 수요자원 입찰자는 경쟁자들보다 낮은 가격입찰을 통해 더 많은 감축량을 판매해야 수익이 증가하게 되므로 수요자간에 경쟁에 의한 게임현상이 벌어지게 된다. 하지만 낮은 가격으로 입찰을 하면 결국 수요자원의 시장가격을 낮추게 되므로 판매

량 대비 수익이 감소하게 된다. 따라서 경쟁자보다 무조건 낮은 가격으로 입찰하는 것이 자신의 이익을 극대화한다고 할 수는 없다. 그러므로 수요자원입찰자 자신의 이익을 극대화하기 위한 적절한 입찰전략을 확인하기 위해서는 수요자간 입찰경쟁을 모형화하여 게임 이론적으로 분석할 필요성이 있다.

3. 모형화

3.1 수요자원시장의 게임참여자

3.1.1 수요자원 구매자

시장운영자는 전력의 수요·공급이 이루어지는 전력시장과 감축량의 구매·공급이 일어나는 수요자원시장을 병행해서 운영한다. 시장운영자는 전력시장에서 발전사로부터 전력을 확보하여 전력수요자에게 이를 공급하는 판매자 역할을 수행한다. 반면에 수요자원시장에서는 수요자원 구매자 역할을 한다. 시장운영자의 수요자원구매는 안정적인 계통운영 및 전력계통의 효율성을 위한 것이다. 이때 수요자원시장에서의 감축계획량 및 감축가격을 결정하는 감축구매량 곡선은 경유 및 LNG 발전기의 변동비 등을 고려하여 시장운영자가 결정한다[9]. 이러한 감축구매량곡선을 그래프로 나타내면 그림 2와 같은 우하향 곡선이 된다.

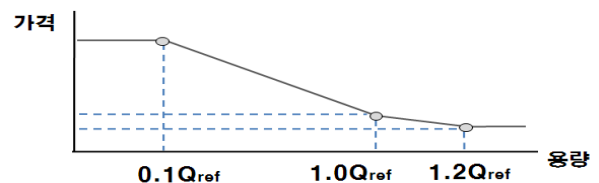


그림 2 감축구매량곡선

Fig. 2 Curtailment Purchase Curve

수요자원시장규칙에서는 그림 2와 같이 가격의 상·하한선과 용량의 구간을 분할해서 선형으로 정의하고 있지만, 본 연구에서는 가격상한선과 하한선이 없는 우하향의 1차 곡선으로 가정하여 수요함수모형으로 사용한다.

3.1.2 수요자원 공급자

전력수요자는 기존 전력시장에서는 시장운영자로부터 전력을 구입하여 사용하는 수요자 역할이지만, 수요자원시장에서는 공급자 역할을 하며, 수요자원 판매를 통해 감축지원금 수익을 얻는다. 수요자원시장운영규칙에 따르면 공급자는 자신이 가지고 있는 수요자원을 수요자원시장에 판매하기 위해 자신의 감축가능용량과 용량별 입찰가격을 5개 구간 이내로 구성하여 제출한다[9]. 이는 수요자원시장에서 공급함수의 역할을 한다. 이것을 그림으로 나타내면 그림 3과 같다.

감축지원금을 기반으로 한 감축시장에서 감축의 기준을 명확히 하는 것은 중요한 문제이다. 전력소비자가 보다 많은 감축지원금 수익을 목적으로 감축실적의 지표인 감축기

준을 왜곡할 우려가 있기 때문이다. 국내 수요자원시장에서는 전력소비자의 과거 전력소비 패턴을 통해서 감축의 기준을 설정한다[9].

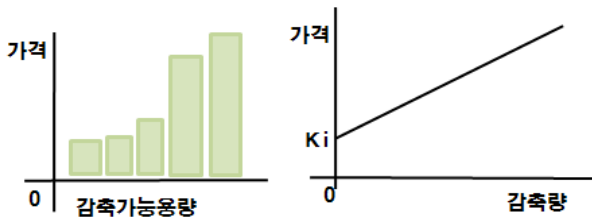


그림 3 수요자원입찰곡선
Fig. 3 Demand Resource Bidding Curve

본 연구에서는 수요자원시장을 고려하지 않은 전력시장에서 시장운영자의 최적화 결과를 감축의 기준으로 사용한다. 또한 수요자원시장에서 공급자의 입찰함수를 그림 3의 우측 그래프와 같이 기울기와 절편을 갖는 1차함수로 가정한다. 그리고 공급자간 입찰경쟁을 모형화하기 위해서 입찰함수의 절편을 이용하여 가격을 변화시키는 모델을 사용한다. 입찰자가 입찰함수의 절편을 변화시키면 입찰가격이 변하게 되고, 입찰가격의 변화는 감축량에 영향을 주며, 이는 수익의 변화로 이어진다.

3.2 수요자원 공급자간 게임 현상

3.2.1 수요자원 공급자의 목적 함수

수요자원시장을 통해 수요를 감축한 전력소비자는 감축량만큼의 전력사용량이 감소하게 된다. 본 연구에서는 전력사용량 감소로 인한 전력수요자의 만족가치(Benefit) 감소를 나타내기 위해 전력시장에서의 전력수요함수의 적분값을 사용한다. 공급자는 입찰전략을 수립함에 있어서 수요 감축으로 인해 발생하는 금전적 수익과 전력사용감소로 발생하는 만족가치감소를 동시에 고려해야 한다. 이를 그림으로 나타내면 아래 그림 4와 같다.

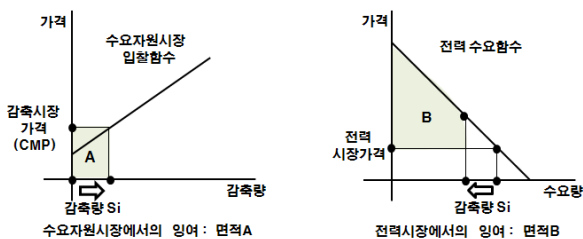


그림 4 수요자원판매로 인한 이득변화
Fig. 4 The Profit Change caused by Demand Curtailment

위 그림 4에서 수요자원을 s_i 만큼 판매하였을 때 전력사용량은 s_i 만큼 감소한다. 이때 면적A는 감축으로 인한 지원금 수익으로서 CMP와 감축량의 곱으로 계산되며, 면적B는 감축 후 전력사용량에 따른 만족가치를 나타낸다. 전력사용량 감소로 인한 가치감소를 직접적인 금전적인 손익으로 정

량화하는 것의 어려움은 기존 연구에서 언급된 바 있다[5]. 본 연구에서는 입찰전략수립의 편의를 위해 전력사용으로 인해 누리게 되는 가치와 수요자원판매로 인한 금전적 수익을 동등한 가치로 가정하여 그 합을 최대화 하는 것을 수요자원입찰자의 목적함수로 정의한다.

3.2.2 수요자원입찰 가격에 따른 변화

수요자원시장에서의 시장가격과 입찰자의 감축량은 시장원리에 따라 공급자간 경쟁을 통해서 결정된다. 이때 입찰자 i 가 입찰함수의 절편 k_i 를 변화시킬 경우에 발생하는 변화를 살펴보면 그림 5와 같다.

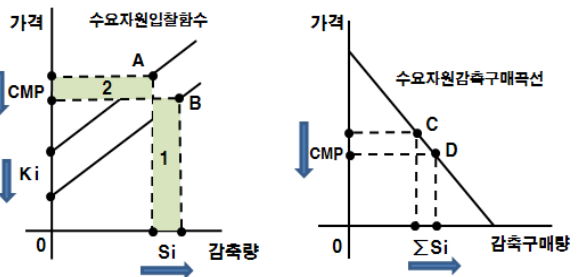


그림 5 전략변수에 따른 이득변화
Fig. 5 Profit Changes from Strategic Variable

다른 경쟁자들의 입찰함수가 변하지 않는 경우에 절편 k_i 를 낮추면 입찰가격이 낮아져 더 많은 감축량을 받게 되며 이는 점 A에서 B로의 이동으로 나타난다. 또한 저렴한 감축량이 시장에 더 투입되므로 감축구매량곡선에 의해 시장가격은 우측그래프에서와 같이 점 C에서 D로 하락하게 된다. 이때 좌측 그래프의 면적 1은 감축량증가로 인해 늘어난 감축지원금 수익이며, 면적 2는 시장가격하락으로 감소된 수익이다. 따라서 k_i 감소에 따른 이득변화는 늘어난 면적 1과 감소한 면적 2의 차와 같다. 이때 k_i 변화에 따른 감축량과 시장가격의 변화는 다른 경쟁자들의 입찰함수에 영향을 받게 된다.

3.2.3 정식화

수요자원시장의 시장가격과 입찰자별 감축량은 그림 1에서와 같이 감축구매량곡선과 입찰자별 입찰함수를 통해 결정된다. 입찰자간 게임현상을 분석하기 위해서 본 연구에서는 입찰함수의 절편을 변화시켜 입찰경쟁을 하는 모형을 사용한다. 입찰자는 이득극대화를 위한 최적전략을 수립하기 위해서 시장운영자의 최적화 과정을 고려해야한다. 다음은 참여자들의 함수와 시장운영자의 최적화를 식으로 표현한 것이다.

$$\text{전력수요함수} : D_i(d_i) = a_i - r_i d_i \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{수요자원} & : \\ \text{입찰함수(공급)} & : f_i(s_i) = k_i + cr_i s_i \quad (2) \end{aligned}$$

감축구매량곡선 (수요) : $D(s_0) = a_0 - r_0 s_0$ (3)

수요자원시장 : $Max SW = B(s_0) - \sum C_i(s_i)$
 시장운영자최적화 : s.t. $s_0 = \sum s_i$ (4)

$D_i(d_i)$: 수요자원판매자 i 의 전력수요함수

a_i : 수요자원판매자 i 의 전력수요함수 절편

r_i : 수요자원판매자 i 의 전력수요함수 기울기

d_i : 수요자원판매자 i 의 전력수요량

$f_i(s_i)$: 수요자원판매자 i 의 수요자원공급함수

k_i : 수요자원판매자 i 의 수요자원공급함수 절편

cr_i : 수요자원판매자 i 의 수요자원공급함수 기울기

s_i : 수요자원판매자 i 의 수요자원판매량

$D(s_0)$: 수요자원구매자의 수요함수

a_0 : 수요자원구매자의 수요함수 절편

r_0 : 수요자원구매자의 수요함수 기울기

s_0 : 수요자원구매자의 총 수요자원구매량

SW : 수요자원시장의 사회적 후생

$B(s_0)$: 수요자원구매자의 이득

$C_i(s_i)$: 수요자원판매자 i 의 감축비용

식 1은 입찰자 i 의 전력수요함수를 나타낸 것으로 전력수요량 d_i 에 따른 전력사용의 만족가치 계산에 사용된다. 식 2는 입찰자 i 의 수요자원 입찰함수로서 감축량 s_i 에 따른 입찰가격을 나타낸다. 식 3은 시장운영자의 감축량구매곡선으로 총 감축구매량 s_0 에 따른 시장가격을 나타낸다.

시장운영자는 사회적 후생(Social Welfare)을 극대화하려고 한다. 이는 식 4에서와 같이 구매자의 이득인 $B(s_0)$ 와 입찰자들의 비용합인 $\sum C_i(s_i)$ 의 차로 표현되며, 구매자의 잉여와 공급자의 잉여의 합으로 정의된다[11]. 여기서 $B(s_0)$ 는 구매함수인 식 3을 적분한 값이며, $\sum C_i(s_i)$ 는 입찰자들의 공급함수인 식 2를 적분한 값을 합한 것이다.

입찰자는 3.2.1절에서 언급한 것과 같이 절편전략 k_i 를 통해서 전력수요함수의 잉여와 입찰함수의 잉여의 합을 최대화하려고 한다. 다음은 입찰자 i 의 이득을 식으로 표현한 것이다.

전력시장에서의 이득 :

$$\pi_{Ei} = (a_i d_i^* - 0.5 r_i d_i^{*2}) - SMP \cdot d_i^* \quad (5)$$

여기서 $d_i^* = d_i - s_i$

수요자원시장에서의 이득 :

$$\pi_{Ci} = (a_0 - r_0 s_0) s_i \quad (6)$$

입찰자 i 의 이득 :

$$\pi_{Ei} + \pi_{Ci} \quad (7)$$

식 5는 전력시장에서의 이득으로서 전력수요함수를 적분하여 구해진 만족가치 $(a_i d_i^* - 0.5 r_i d_i^{*2})$ 에서 전력사용에 따른 지불금액 $(SMP \cdot d_i^*)$ 을 뺀 값이다. 여기서 d_i^* 는 입찰자 i 의 감축결과 결정된 실제 전력수요량으로서 본래 전력수요량 d_i 에서 감축량 s_i 를 차감한 값이다. 식 6은 수요자원시장에서의 이득으로 감축가격 $(a_0 - r_0 s_0)$ 과 입찰자 i 의 감축량 s_i 를 곱한 값이다. 수요자원시장에서 입찰자의 목적함수는 식 7에서와 같이 전력사용으로 인한 이득과 감축시장 이득을 합한 값의 최대화이다.

4. 내쉬균형상태

내쉬균형(Nash Equilibrium:NE)은 다른 참여자가 전략을 바꾸지 않는 한 자신의 전략을 바꿀 필요가 없는 균형상태를 말한다[11]. 수요자원시장 모형화에서 선로제약 고려 시에는 미분불가능영역의 존재로 인해 계산상 어려움이 있으며 복합전략이 나타난다. 반면 비제약 시에는 계산이 용이한 단순전략이 나타나며 국내 수요자원시장에서와 같이 단일 시장가격이 형성된다. 본 연구에서는 선로제약이 수요자원입찰에 미치는 영향은 고려되지 않았다. 한편 수요자원시장에서의 입찰자의 최적전략은 참여자간 상호연관성을 고려하여 수립되어야 한다. 이는 시장가격과 감축량이 입찰자간 경쟁을 통해 결정되기 때문이다. 본 연구에서는 이를 분석하기 위해 모형을 통해서 균형상태에서의 이득극대화 조건을 분석하였다.

4.1 그래프에서의 특징

수요자원입찰자는 자신의 이득을 극대화하기 위한 목적을 가지고 있다. 만약 감축량 Δs_i 로 인한 전력사용가치의 변화와 감축지원금 수익이 다르다면, 수요자원입찰자는 보다 더 높은 가치를 가지게 되는 시장으로 수요자원을 투입하고 싶은 것이다. 따라서 수요자원입찰자의 이득극대화가 된 최적상태라면 감축량 Δs_i 가 전력시장과 수요자원시장에서 갖는 가치는 같을 것이다. 그림 6은 절편 k_i 가 감소할 경우의 상황을 그림 5에 반영하여 나타낸 것이다.

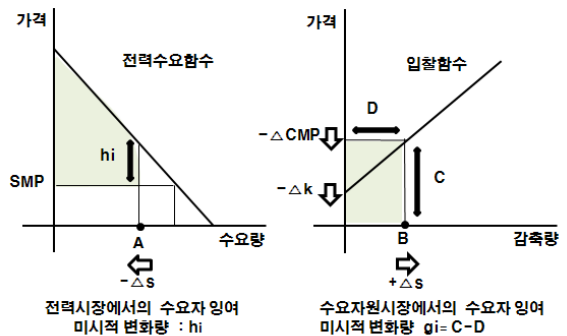


그림 6 전력수요함수와 입찰함수에서의 이득극대화 조건
 Fig. 6 Condition for Profit Maximization in DRM and Electricity Market

위 그림 6에서 h_i 는 입찰자 i 의 전력사용량이 점 A에서 Δs_i 만큼 감소할 때의 발생하는 전력수요함수 상에서의 미시적 잉여변화량을 나타낸 것이다. g_i 는 입찰자 i 의 감축량이 점 B에서 Δs_i 만큼 증가할 때 감축지원금 수익변화를 나타낸 것으로 C-D로 표현됨은 그림 5에서 확인할 수 있다. h_i 와 g_i 의 절대값이 같을 때 입찰자 i 는 자신의 이득을 극대화하기 위해 전략을 변화시킬 필요가 없게 된다. 위의 개념을 이득을 극대화하기 위한 최적대응(Best Response)식상에서 나타내면 다음과 같다.

입찰자 i 의 이득 :

$$\begin{aligned} & \pi_{Ei} + \pi_{Ci} \\ & = (a_i d_i^* - 0.5 r_i d_i^{*2}) - SMP \cdot d_i^* + (a_0 - r_0 s_0) s_i \end{aligned} \quad (8)$$

절편 k_i 에 따른 입찰자 i 의 이득변화율 :

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\pi_{Ei} + \pi_{Ci})}{\partial k_i} & = \frac{\partial d_i^*}{\partial k_i} (a_i - r_i d_i^* - SMP) \\ & + \frac{\partial s_i}{\partial k_i} (a_0 - r_0 s_0) - \frac{\partial s_0}{\partial k_i} r_0 s_i = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

입찰자 i 의 전력수요량 변화량은 감축량과 같다. 따라서 절편전력 k_i 에 따른 실수요량의 변화율인 $\partial d_i^* / \partial k_i$ 와 감축량의 변화율인 $\partial s_i / \partial k_i$ 는 서로 절대값은 같고 부호만 다르다. 이를 이용해 식 9를 입찰자가 3명(i, j, k)일 때에 대해서 정리하면 다음 식 10과 같다.

$$(a_i - r_i d_i^* - SMP) - (a_0 - r_0 s_0) + \beta_i s_i = 0 \quad (10)$$

여기서

$$\begin{aligned} \beta_i & = \frac{\partial d_i^*}{\partial k_i} / \frac{\partial s_0}{\partial k_i} \\ & = \frac{r_0 c_j c_k}{r_0 c_j + r_0 c_k + c_j c_k} = \frac{1}{\frac{1}{r_0} + \frac{1}{c_j} + \frac{1}{c_k}} \end{aligned}$$

위 식 10에서 s_i 앞의 β_i 는 시장참여자간 상호연관성이 나타난 것으로서 구매함수 기울기 r_0 와 입찰자 j, k 의 입찰함수 기울기인 c_j, c_k 를 포함하는 것을 알 수 있다. 만약 입찰자 j 에 대해 파라미터 β_j 를 정리하면 r_0, c_i, c_k 로 표현된다. 식 10에서 $(a_i - r_i d_i^* - SMP)$ 는 절편 k_i 변화에 의한 전력사용 만족가치 변화량이다. 이것은 그림 6에서 h_i 와 같다. 그리고 $(a_0 - r_0 s_0) - \beta_i s_i$ 는 입찰자 i 의 절편 k_i 변화에 의한 감축수익변화량으로서 그림 6에서 g_i 와 같다. 만약 입찰자 모두가 $h_i = g_i$ 를 만족한다면 모두 자신의 이득이 극대화된 상태이므로, 상대방이 현재 전략을 유지한다는 전제 하에 자신도 현재 전략을 바꿀 유인이 없는 균형상태인 내쉬균형상태이다.

4.2 공급자간 상대적 감축의지

입찰자가 수요자원시장을 통해서 할당받게 되는 감축량은 자신의 입찰전략인 절편 선택의 결과이며, 선택한 절편은 자신의 이득을 극대화하기 위해서 전략적으로 계산한 값이다. 따라서 입찰자의 이득극대화를 위한 최적대응과정을 수식적으로 분석해보면 입찰자간 상대적인 감축의지를 알 수 있다. 이를 위해 식 10에 실제 전력수요량인 $d_i^* = d_i - s_i$ 를 대입하여 정리하면 $a_i - r_i d_i = SMP$ 이므로 입찰자 i 의 감축량은 다음 식 11과 같이 정리된다.

$$s_i = \frac{a_0 - r_0 s_0}{\beta_i + r_i} \quad (11)$$

위 수식에서 $a_0 - r_0 s_0$ 는 감축가격으로서 입찰자 모두 동일한 값을 가진다. 따라서 DRM에서의 가격이 높을수록 절대적 감축의지는 높아지고, 분모인 $\beta_i + r_i$ 가 작을수록 입찰자 i 는 상대적으로 더 많은 감축량을 할당받게 될 것이다. 결과적으로 수요자원시장에 참여하는 입찰자들의 $\beta_i + r_i$ 값을 비교해보면 어느 입찰자가 상대적으로 더 많은 감축량을 할당받게 될 것인지를 알 수 있으므로 입찰자간의 상대적인 감축의지를 가늠할 수 있는 척도로 이용이 가능하다.

5. 사례 연구

본 연구에서는 수요자원시장에서의 입찰자 3인 간의 경쟁을 모형화하기 위해서 그림 7과 같은 모형을 사용한다. 모형에서는 국내 수요자원시장에서와 같이 단일 시장가격이 형성되도록 하기 위해서 기타 제약조건은 설정하지 않았다. 그림 7에서 시장운영자는 수요자원시장에서의 감축량 구매자 역할이며, $D_1 \sim D_3$ 는 입찰자로서 수요자원시장에서 수요자원 공급자 역할을 한다. 입찰자들은 입찰함수의 절편 k_i 를 통해 경쟁을 한다.

Market Operator(M.O)

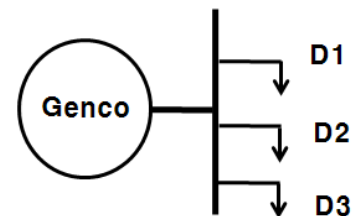


그림 7 수요자원시장 모형

Fig. 7 Diagram of Demand Resource Market

그림 7에서의 Genco는 발전사로서 전력시장 최적화에서 사용되어 SMP와 입찰자들의 기준수요량 결정에 관여하게 된다. 다음 표 1은 사례연구에서 사용된 수요자원시장 참여자들의 데이터이다.

표 1 수요자원시장 모형의 데이터

Table 1 Demand Function and Demand Side Bidding Data

참여자		절편	기울기
감축구매량곡선		90	-0.8
전력 시장	G	발전기비용함수	15
	D_1	수요함수1	300
	D_2	수요함수2	320
	D_3	수요함수3	330
수요 자원 시장	f_1	수요자원입찰함수1	k_1
	f_2	수요자원입찰함수2	k_2
	f_3	수요자원입찰함수3	k_3

모형에서 감축량 판별의 기준이 되는 수요값은 수요자원 시장을 고려하지 않은 전력시장 최적화 결과로써 얻어진다. 이는 표 1에서의 발전기 비용함수와 전력수요자들의 수요함수를 고려한 시장운영자의 최적화를 통해 얻어지며 표 2에서의 기준전력수요값과 같다.

수요자원시장의 시장가격과 입찰자들의 감축량은 감축구매량곡선과 수요자원입찰함수들을 통해서 결정된다. 이때 입찰자들은 자신의 이득을 극대화하기 위한 최적 k_i 를 찾고자 한다. 본 연구에서는 내쉬균형을 이용해서 입찰자들의 경쟁의 균형상태를 계산했다. 다음 표 2는 수요자원시장의 입찰경쟁모형을 시뮬레이션 한 결과 균형상태에서 나타난 입찰자들의 감축결과와 절편값이다. 이때의 DRM 시장가격은 22.7(원/MWh)이다.

표 2 수요자원시장의 결과

Table 2 Result of Demand Resource Market

	기준전력수요(MW)	감축량(MW)	절편값(k_i)
D 1	342.38	31	7.16
D 2	318.28	28	5.96
D 3	287.41	25	5.11

입찰자들의 경쟁의 균형상태를 확인하기 위해 입찰자들의 기대이득을 확인할 필요가 있다. 기대이득은 자신 이외의 참여자가 현재의 선택을 유지하고 자신만이 입찰변수를 변화시켰을 때 입찰자 i 의 절편 k_i 에 따른 이득의 변화를 나타낸다.

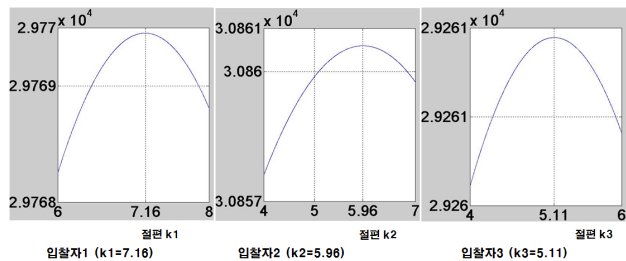


그림 8 입찰자의 기대이득
Fig. 8 Bidder's expected Profits

그림 8에서 각 입찰자들의 이득극대점에서의 k_i 값이 표 2에서 계산된 절편값과 일치함을 알 수 있다. 따라서 표 2에서의 k_i 값들은 모든 참여자가 현재의 선택을 바꿀 유인이 없는 내쉬균형상태임을 알 수 있다.

본 연구에서는 제안된 모형에서의 게임이론을 통한 분석 결과를 4.1-4.2절에서 언급하였다. 표 3과 표 4는 시뮬레이션 결과값을 통해 이를 확인한 것이다.

표 3 내쉬균형조건 확인

Table 3 Verification of the Condition at Nash Equilibrium

	h_i	g_i
입찰자 1	15.547	15.547
입찰자 2	16.739	16.739
입찰자 3	17.591	17.591

시뮬레이션결과 얻어진 상태에서 단위수요자원이 전력사용으로 소모될 경우 가치는 h_i 이고, 판매를 할 경우의 가치는 g_i 이다. 4.1절에서 말한 언급한 것과 같이 두 값이 같을 때 공급자의 이득이 극대화된 상태이며, 표 3에서처럼 공급자 모두가 서로의 전략에 대해 최적대응상태를 유지하고 있는 것이 내쉬균형상태이다.

표 4 수요감축의지 파라미터

Table 4 Parameters of Consumers' Curtailment Willingness

	$1/(\beta_i + r_i)$	감축량
입찰자1	1.3696	31
입찰자2	1.2289	28
입찰자3	1.1069	25

제안된 모형에서 내쉬균형상태일 때의 특징을 분석한 결과 얻어진 파라미터인 β_i 를 이용하면 4.2절에서 언급한 것처럼 공급자간 상대적 감축의지를 확인할 수 있다. 표 4는 $1/(\beta_i + r_i)$ 값이 클수록 보다 많은 감축량을 갖는 시뮬레이션 결과를 확인한 것이다.

수요자원입찰시장에서의 경쟁전략은 모형화를 통한 시뮬레이션 분석 결과에서 알 수 있듯이 자신만의 전략을 고려한 최적전략은 있을 수 없으며, 참여자간 상호연관성을 고려함으로써 최적화될 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 입찰자간 경쟁의 효과를 분석하기 위해서 입찰경쟁모형을 수립하였으며 게임이론에 기반한 분석기법을 제안하였다. 수요자원시장의 입찰경쟁을 모형화하기 위해서 시장운영자의 감축구매량곡선과 입찰자의 감축량입찰을 국내 수요자원시장 운영규칙을 참고하여 각각 수요함수와 공급함수로 모형화 하였다. 전력수요 감축으로 발생하는 지원금 수익과 전력사용량 감소로 인한 만족가치감소를 같이 고려하기 위해 입찰자입장에서의 확장된 이득함수를 제안하

었다. 각 참여자의 기대이득함수를 통해서 내쉬균형임을 확인하였으며, 전력시장과 수요자원시장에서의 이득극대화 상태의 특징을 분석하여 감축의지에 대한 지표를 유도하였다.

감사의 글

이 연구는 단국대학교 대학원 연구보조장학금의 지원으로 이루어진 것임

참 고 문 헌

[1] 손윤태, 수요반응에 의한 선진형 수요관리체계 필요, 전기위원회 2010년 86회차 웹진, 2010. 6. 24
 [2] California ISO, Demand Response Initiative, <http://www.caiso.com/1893/1893e350393b0.html>
 [3] PJM, Demand Respose Reference Materials, <http://www.pjm.com/markets-and-operations/demand-response/dr-reference-materials.aspx>
 [4] 전력부하관리포털, 2009년 하계 수요자원시장 운영결과, <http://www.kdrm.or.kr>
 [5] M.H. Albadi, , E.F. El-Saadany, "Demand Response in Electricity Markets: An Overview," Power Engineering Society General Meeting, 2007, pp.1-5
 [6] A.C. Tellidou, A.G. Bakirtzis, "Demand Response in Electricity Markets," *Intelligent System Applications to Power Systems*, 2009. ISAP '09. 15th International Conference, 2009, pp. 1-6
 [7] Chua-Liang Su, D. Kirschen, "Quantifying the Effect of Demand Response on Electricity Markets," *Power Systems, IEEE Transactions on* Volume: 24, Issue: 3, 2009, pp.1199-1207
 [8] Dan Yang; Yanni Chen, "Demand Response and Market Performance in Power Economics," Power & Energy Society General Meeting, 2009. PES '09.IEEE, pp. 1-6

[9] 전력부하관리포털, 수요자원시장운영규칙, <http://www.kdrm.or.kr>
 [10] Paulson, E.J., "Demand response as ancillary services in the PJM RTO," Power Engineering Society General Meeting, Vol. 2, 2005, pp.1575 - 1578
 [11] Daniel S. Kirschen, and Goran Strbac. *Fundamentals of power system economics*, John Wiley & Sons, 2004. pp.11-47.

저 자 소 개



이 광 호 (李 光 浩)

1965 12월 22일생. 1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 전력연구원 위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 공대 전자전기공학부 교수
 Tel : 031-8005-3604
 E-mail : khlee@dgu.edu



조 성 위 (趙 成 偉)

1981년 12월 7일생. 2008년 단국대 공대 전기전자컴퓨터공학과 졸업. 2008 ~ 현재 동 대학원 전자전기공학과 석사과정.
 Tel : 031-8005-3621
 E-mail : Sungwi221@gmail.com