creative commons

COMMONS DEED

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

dCollection

공학석사 학위논문

가정용 전력 사용자 수요관리를 위한 최적 경매 메커니즘 설계

An Optimal Auction Mechanism Design for Residential Demand Response in Electricity Market

2023 년 2 월

서울대학교 대학원

산업공학과

홍 정 인

가정용 전력 사용자 수요관리를 위한 최적 경매 메커니즘 설계

An Optimal Auction Mechanism Design for Residential Demand Response in Electricity Market

지도 교수 이 덕 주

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2022 년 11월

서울대학교 대학원
산업공학과

홍 정 인

홍정인의 공학석사 학위논문을 인준함

2022 년 12 월

위 원 장 홍 성 필 (인)
부위원장 이 덕 주 (인)
위 원 장 우 진 (인)

초 록

수요반응(Demand Response, DR)자원 거래 시장의 규모가 커짐에 따라 대규모 산업용 전력 소비자 중심에서 주택·상점 등 소규모 전력 소비자까지 그 대상을 확대하고자 전력거래소는 국민 DR 시범사업을 시행했다. 본 논문은 현재 국민 DR 상황을 다중 수량 조달 경매(multi-unit procurement auction) 방식으로 모형화하고, 참여 고객들의 신뢰도를 고려한 두 가지의 경매 메커니즘 모형을 제안한다. 첫번째 모형은 최적 경매 메커니즘 모형으로, 참여 고객의 신뢰도를 고려한 수요관리사업자의 최적화 문제를 풀어 최적의 할당 함수 및 비용 함수를 구할 수 있다. 두번째 모형은 신뢰도를 바탕으로 경매에 참여할 고객의 수를 제한하는 방식의 경매 메커니즘이다. 두 메커니즘 모두 유인 일치성(incentive compatibility)과 개인적 합리성(individual rationality) 조건을 만족하는 것을 증명하였으며, 국내 전력 소비 데이터를 활용한 시뮬레이션 실험을 통해 두 경매 메커니즘에 따른 수요관리사업자의 기대 비용 및 참여고객들의 기대 효용을 비교 분석하였다.

주요어: 수요반응, 다중 수량 조달 경매, 최적 경매 메커니즘, 메커니즘 디자인

학번: 2021-24543

목 차

초록 i

목차 ii

표 목차 iv

그림 목차 v

제 1 장 서론 1

제 1 절 연구 배경

제 2 절 문제 정의

제 3 절 논문 구성

제 2 장 선행연구 6

제 3 장 가정용 전력 사용자 수요관리를 위한 경매 모형 10

제 1 절 최적 경매 메커니즘의 일반 모형

제 2 절 입찰 제한 국민 DR 경매 모형

제 3 절 신뢰도를 고려한 최적 국민 DR 경매 모형

제 4 장 수치 분석 24

제 1 절 파라미터 설정

제 2 절 수요관리사업자의 기대 비용 비교 분석 결과

제 3 절 참여고객의 기대 효용 비교 분석 결과

제 4 절 낙찰 받은 고객의 평균 신뢰도 비교 분석 결과

제 5 절 수요감축목표량 변화에 따른 민감도 분석 결과

제 5 장 결론 35

참고문헌 37

Abstract 39

부록 41

표 목차

[표 1] 서울특별시 가구 평균 월별 전력 사용량 및 전기요금 24

[표 2] 파라미터 설정 24

[표 3] 낙찰 받은 고객들의 월별 평균 신뢰도 31

그림 목차

[그림 1] 국민 DR의 현행 절차 2

[그림 2] 전력 수요감축 경매시스템 14

[그림 3] 수요관리사업자의 월별 기대 비용 25

[그림 4] 수요관리사업자의 일별 기대 비용 (5월) 26

[그림 5] 수요관리사업자의 일별 기대 비용 (8월) 27

[그림 6] 참여 고객들의 월별 기대 효용 28

[그림 7] 참여 고객들의 일별 기대 효용 (5월) 29

[그림 8] 참여 고객들의 일별 기대 효용 (8월) 29

[그림 9] 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰 단가 (5월) 33

[그림 10] 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰 단가 (8월) 33

[그림 11] 수요감축목표량 변화에 따른 평균 신뢰도 (5월) 34

[그림 12] 수요감축목표량 변화에 따른 평균 신뢰도 (8월) 34

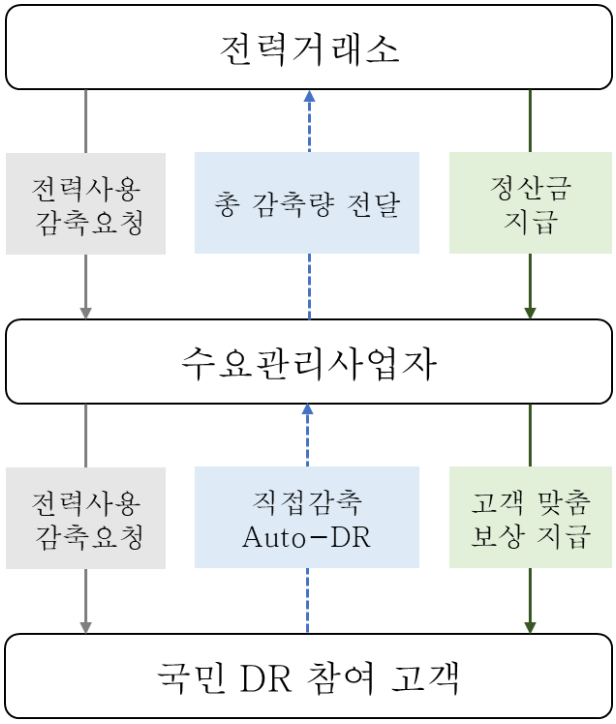
제 1 장 서론

제 1 절 연구 배경

수요반응제도(Demand Response, 이하 “DR”)은 전력 계통 안정화를 위한 방안으로써 발전설비 투자비용의 급증에 따라 최소의 비용으로 최적의 전력을 공급하기 위한 수요측 대안으로 대두되었다. 최근 환경문제와 관련하여 기후변화에 대한 경제적 대응을 위한 수단으로써 친환경 에너지정책 대안으로 강조되어 수요자원거래시장 규모가 빠르게 커지고 있다. 그에 따라 계약 전력이 크고 전력 소비 패턴이 비교적 일정하여 수요 감축이 용이한 대규모 전기사용자 중심에서 일반 가정으로 확대하여 ‘에너지쉼표 제도’(이하 “국민 DR”)를 시행하고 있다.

수요반응제도를 일반 가정까지 확대한 이유는 동·하계 전력 피크 시간대에 주택용 전기 사용량이 전체 소비량의 절반 이상을 차지하기 때문이다. 개개인의 전기소비량은 적고 전력 소비 패턴이 일정치 않아 전력수요 예측이 어려우나, 집단으로 추산하면 수요반응자원으로서 큰 가치를 지닌다. 주거용 AMI 보급 확대, 미이행 시 위약금 면제 등 국민 DR 참여를 유도하기 위한 방안을 실시하고 있으나, 국내 수요자원거래시장은 아직까지 표준 DR, 중소 DR 등 기존 대규모 전기사용자 중심으로 거래가 이루어지고 있다.

국민 DR은 전력거래소에 상장된 수요관리사업자를 통해 국민 DR에 참여한 일반 가정 등 소규모 전기사용자가 전력수요 감축요청에 따라 전기 사용량을 감축하면 감축량에 대해 금전적 보상을 지급받는 제도이다. 주택용 및 공동 건물에 속해 있는 개별 세대 전기사용자 또는 계약전력이 70kW 이하 전기사용자를 대상으로 하고, 실시간 전력수요 의무감축요청에 따라 수요자원거래시장에 참여할 수 있다. 전력수요 감축요청은 감축시작시각 최소 30분 전까지 발령되며, 일일 최대 1회 1시간 동안 전기 사용량 감축을 지속해야 한다. [그림 1]은 현재 국민 DR이 시행되는 절차를 간략하게 나타낸 것이다.



[그림 1] 국민 DR의 현행 절차

국민 DR 수행 이후 전력거래소가 수요관리사업자에게 지급하는 정산금은 전력시장운영규칙에 의해 계산되며, 평균적인 단가는 약 1,300원/kWh 이다. 반면에 수요관리사업자가 국민 DR 참여 고객에게 지급하는 보상은 현금, 포인트상품권 등 고객이 원하는 형태로 지급되며, 정산 단가는 현재 수요관리사업자마다 상이한 실정이다. 시범사업 실증 분석 보고서에 따르면, 지난 2년간 3배 이상 참여자원 수가 증가하였으나 적은 정산금으로 참여고객 증가량에 비해 감축량이 저조한 것으로 분석하였다. (Hyungok et al., 2022) 따라서, 국민 DR을 활성화하기 위한 제도적 개선이 필요하다.

제 2 절 문제 정의

본 논문은 현재 국민 DR 상황을 다중 수량 조달 경매(multi-unit procurement auction)로 구성하고, 두 가지 방식의 경매 메커니즘을 제안하고자 한다. 첫번째 방식은 최적 경매 메커니즘으로, 참여 고객의 신뢰도를 고려한 수요관리사업자의 최적화 문제를 풀어 최적의 할당 함수 및 비용 함수를 구할 수 있다. 두번째 방식은 유인 일치성(incentive compatibility) 조건을 만족하도록 기존의 전력 수요감축 경매시스템을 보완한 것으로, 신뢰도를 바탕으로 경매에 참여할 고객의 수를 제한하는 방식이다. 제안하는 경매 메커니즘의 참여자는 수요관리사업자와 참여 고객들이고, 각 주체에 대한 설명은 다음과 같다.

수요관리사업자는 구매자이자 경매인(auctioneer)으로서 전력거래소에서 요구한 수요감축목표량을 조달하면서 참여 고객들에게 지급하는 정산금의 총합을 최소화하려는 목적함수를 가진다. 참여 고객에게 입찰 단가를 수신받고, 고객의 신뢰도를 고려하여 목적함수에 따라 경매 결과를 결정한다. 경매 결과에 따라 참여 고객이 DR을 수행한 이후 수요관리사업자는 감축량에 비례하여 참여 고객에게 정산금을 지급한다. 참여 고객은 판매자로서 DR 수행 시간에 절약할 전기에 대한 단위 요금을 입찰하고 경매 결과에 따라 낙찰 받은 감축량만큼의 전기 수요를 감축하고 감축량에 비례하여 정산금을 받는다.

경매 메커니즘을 통해 참여자 본인이 느끼는 가치에 대한 효용을 최대화하는 전략적 행동에 따라 입찰 가격을 결정하는 것은 경매 결과의 합리성을 결정하는 중요한 요인이다. 또한, 참여고객 풀이 증가함에 따라 목표 감축량 미달 시 수요관리사업자 및 전력계통이 겪는 리스크가 커지므로 참여 고객의 감축 이행률을 보장할 수 있는 요소로써 수요감축 신뢰도를 고려하여 경매 메커니즘을 설계하였다.

제 3 절 논문 구성

본 논문은 5장으로 구성된다. 제 2장에서는 관련된 선행 연구를 살펴보고, 제 3장에서는 국민 DR 상황에 맞게 설계한 두 가지 방식의 경매 메커니즘을 제시한다. 제 4장에서는 국내 전력 소비 데이터를 기반으로 한

시뮬레이션 실험을 통해 두 메커니즘의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 제 5장에서는 결론과 향후 연구방향을 제시한다.

제 2 장 선행연구

수요반응제도와 관련된 연구는 지속적으로 진행되어 왔으며, 국가별 전력시장에 맞는 수요반응 프로그램 모델링 및 사례 연구와 국가별 현행 DR 제도를 비교하고 한계점을 제시하여 정리하는 연구를 중심으로 이루어졌다. Oconnell et al. (2014)은 현행 DR 제도의 특징 및 한계점과 수요반응 관련 연구에 대한 비판적 의견을 제시했다. 현재 전력시장 구조에 맞춘 적절한 수요반응 거래시장 메커니즘의 부재와 주택용 전기 소비자들에게 맞는 규제 및 보조금 정책이 활성화되지 않은 점을 수요반응제도의 가장 큰 장벽이라고 지적했다. Torriti et al. (2010)은 유럽 각국에서 수요반응제도를 활성화시킨 요인과 발전을 저해한 요인들에 대해 제시했다.

또한, 게임 이론적 방법론과 메커니즘 디자인을 이용하여 수요반응 프로그램 모형을 제안한 연구도 활발하게 진행되고 있다. Wang et al. (2019)은 수요관리사업자가 전기가격 변동성으로 인한 위험도를 최소화하도록 하는 최적 입찰 전략을 제시하고 고객 참여를 유도하는 정량적 보상 메커니즘을 설계했다. Kamyab et al. (2016)은 스마트 그리드에서 다양한 유틸리티 회사와 고객들이 존재할 때 각 그룹에 대한 비협조적 게임을 모델링하고, 각 게임에서의 내쉬균형의 존재 및 고유성을 분석했다. Nekouei et al. (2015)은 게임 이론적 방법론을 이용하여

전력시장 전체에 대한 수요반응 프레임워크를 제시했다. 수요관리사업자와 발전기가 경쟁하는 Stackelberg 게임과 수요관리사업자와 소비자 간의 상호작용을 나타낸 Vickrey-Clarke-Groves 메커니즘으로 모델링하고, 호주 전력시장에 대한 사례 연구를 통해 제안한 프레임워크의 성능을 분석했다.

기존 연구에서는 국가별 전력시장 구조에 맞는 수요반응 프로그램의 프레임워크 제안, 현행 수요반응제도의 한계점 분석, 스마트 그리드 하에서의 수요반응 메커니즘 설계 등이 이루어졌다. 그러나 많은 연구에서 수요반응 제도를 활성화하는 방안을 제시하는 데에 있어서 각 국가의 전력시장 구조에 맞는 해결책을 제안하고 있어 우리나라 상황에 적용하기 어렵다는 한계점이 존재한다.

한편, 정보 통신 기술이 발전함에 따라 스마트 그리드, 주택용 AMI(Advanced Metering Infrastructure), 스마트 가전 등 전력계통과 전기소비자 간의 양방향 통신을 가능하게 하는 방안이 보급되고 있다. 그에 따라 국민 DR과 같은 주택용 전기 소비자들을 대상으로 하는 수요반응 프로그램과 관련된 연구가 비교적 최근에 제안되고 있다. 먼저 가격 기반 수요반응 프로그램에 대한 연구 개요는 다음과 같다. Haider et al. (2016)에 따르면, 대부분의 주택용 수요반응 프로그램 체계에서 소비자들의 전기 소비 수준과 무관하게 동일한 요금 수준이 적용되고, 그에 따라 부정적 외부효과가 발생하여 수요반응 거래시장의 비효율성을

초래한다. Yan et al. (2018)은 세 가지 방식의 가격 기반 수요반응 프로그램에 대한 연구 개요와 각 방식의 장단점을 비교하여 제시했다. 대부분의 연구에서 가격에 반응하지 않는 주택용 전기 소비자들의 비율이 상당히 큰 부분을 차지하고 있음을 문제점으로 지적하고 있으며, 전기 요금 외에도 소비자들의 피크 전력 수요를 절감하기 위해서는 다양한 제도적 장치의 필요성을 강조하고 있다. 이어서 인센티브 기반 수요반응 프로그램에 대한 연구 개요는 다음과 같다. Mohsenzadeh et al. (2018)은 마이크로 그리드의 전력 계통 안정을 위해 수요반응 프로그램을 통합한 모형을 제안하고 유틸리티 회사의 이익과 소규모 전기 소비자의 만족도를 고려한 최적해를 제시했다. Ruzbahani & Karimipour (2018)은 스마트 그리드 기술을 바탕으로 피크 시간대 가전제품의 전기수요를 조정하기 위한 최적화 모델을 제안했다.

주택용 전기 소비자들을 대상으로 하는 수요반응 프로그램에 대한 기존 연구는 가격 기반 수요반응제도를 대상으로 한 연구가 대부분이고, 인센티브 기반 수요반응을 대상으로 한 연구가 부족하다. 우리나라 수요자원거래시장은 인센티브 기반 수요반응 제도에 따라 운영되고 있으며, 기존 수요반응 제도와 함께 국민 DR 제도를 활성화할 수 있도록 국민 DR 상황에 맞는 경매 메커니즘을 제안하는 연구가 필요하다고 판단된다.

Myerson (1981)은 메커니즘 디자인 분야에서 최적 경매 메커니즘의

기초가 되는 연구로서, 균형성 가정(regularity assumption)하에 경매인의 기대 수익을 최대화하는 최적해에 해당하는 할당 함수와 비용 함수를 제시했다. Maskin & Riley (2000)는 Myerson (1981)의 최적 경매 메커니즘을 바탕으로 다중 수량 경매 상황으로 확장한 연구로서, 다중 수량 경매 상황에서의 균형성 가정과 최적해를 제시했다.

경매 메커니즘과 관련된 기존 연구는 위 논문들을 기초로 꾸준히 발전해왔으나, 수요반응제도에 경매 메커니즘을 적용하여 분석한 연구가 부족하다. 따라서, 우리나라 국민 DR 상황에 적용할 수 있는 최적 경매 메커니즘을 제안하는 연구가 필요하다.

제 3 장 가정용 전력 사용자 수요관리를 위한 경매 메커니즘 모형

제 1 절 최적 경매 메커니즘의 일반 모형

메커니즘 디자인 이론은 설계자가 원하는 특정한 결과를 달성하기 위한 전략적 게임을 설계하는 것을 목적으로, 불완전 정보 하에서 비협조적 게임을 고려한다. 일반적인 경매 상황에 대한 설명은 다음과 같다.

n명의 입찰자가 존재하고, 입찰자 집합은 $N = \{1,2,\dots,n\}$으로 표현한다. 각 입찰자는 합리적이며 자신이 생각하는 물건의 가치에 따라 전략적으로 입찰한다. 입찰자 i의 가치는 v_i로 표현하고, 사적 정보로서 자신을 제외한 다른 입찰자의 가치는 정확하게 알 수 없고 가치에 대한 확률 분포($f_i: [\underline{v_i}, \overline{v_i}]$)만 알려져 있다고 가정한다. 경매인은 하나의 물건을 팔고자하고, 자신의 기대 수익을 최대화할 수 있는 경매 메커니즘을 설계하고자 한다.

경매 메커니즘은 입찰 내용에 따른 경매 결과를 결정하는 두 가지 함수로 표현한다. 할당 함수(x)는 각 입찰자에게 낙찰될 확률을 결정하고, 비용 함수(t)는 낙찰 가격을 결정한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{x}: V \to \mathbb{R}_+$$

$$\mathrm{t}: V \to \mathbb{R}_+$$

입찰자 i의 가치가 v_i일 때, 입찰자 i가 v_i'로 입찰할 경우에 경매 메커니즘에 따른 입찰자 i의 기대 효용은 다음과 같다.

$$U_i(v_i'; v_i) = \int_{V_{-i}} \left(v_i x_i(v_i', v_{-i}) - t_i(v_i', v_{-i})\right) f_{-i}(v_{-i}) dv_{-i}$$

최적 경매 메커니즘은 경매인의 기대 수익을 최대화하는 목적함수를 가지고, 유인 일치성(incentive compatibility)과 개인적 합리성(individual rationality)조건을 만족한다.

정의 1. (유인 일치성, Incentive compatibility) 모든 입찰자에 대하여 자신의 가치를 솔직하게 입찰하는 것이 기대 효용을 최대화한다면, 경매 메커니즘은 유인 일치성 조건을 만족한다.

$$U_i(v_i; v_i) \geq U_i(v_i'; v_i) \quad \forall i \in N, \forall v_i \in \left[\underline{v_i}, \overline{v_i}\right], \forall v_i' \in \left[\underline{v_i}, \overline{v_i}\right]$$

정의 2. (개인적 합리성, Individual rationality) 모든 입찰자에 대하여 경매에 참여했을 때의 입찰자의 기대 효용이 경매에 참여하지 않았을 때보다 크다면, 경매 메커니즘은 개인적 합리성 조건을 만족한다.

$$U_i(v_i) \geq 0 \quad \forall i \in N, \forall v_i \in [\underline{v_i}, \overline{v_i}]$$

정의에 따라서, 최적 경매 메커니즘을 구하는 문제는 다음과 같은 최적화

문제로 표현할 수 있다.

$$\max_{\mathrm{x,t}} \ \Pi(\mathrm{x},\mathrm{t}) = \int_V \sum_{i\in N} t_i(v)\, f(v) dv$$

$$\begin{aligned} s.t. \quad & U_i(v_i; v_i) \geq U_i(v_i'; v_i) && \forall i \in N, \quad \forall v_i \in [\underline{v_i}, \overline{v_i}], \quad \forall v_i{}' \in [\underline{v_i}, \overline{v_i}] \\ & U_i(v_i) \geq 0 && \forall i \in N, \quad \forall v_i \in [\underline{v_i}, \overline{v_i}] \\ & \sum_{i\in N} x_i(v) \leq 1 \ and \ 0 \leq x_i(v) \leq 1 && \forall i \in N, \quad \forall v \in V \end{aligned}$$

Myerson (1981)에 따르면, 균형성 가정(regularity assumption) 하에 위 최적화 문제의 해를 구할 수 있다. 유인 일치성과 개인적 합리성 조건과 동치인 조건들을 이용하여 최적화 문제를 재구조화 하면 다음과 같다.

가정 1. (균형성, Regularity) 모든 입찰자 i 에 대하여 $\psi_i(v_i)$ 가 v_i 에 대하여 감소하지 않는다.

$$\max_{\mathrm{x}} \ \int_V \left[\sum_{i\in N} \psi_i(v_i) x_i(v)\right] f(v) dv \,, where \ \psi_i(v_i) = v_i - \frac{1 - F_i(v_i)}{f_i(v_i)}$$

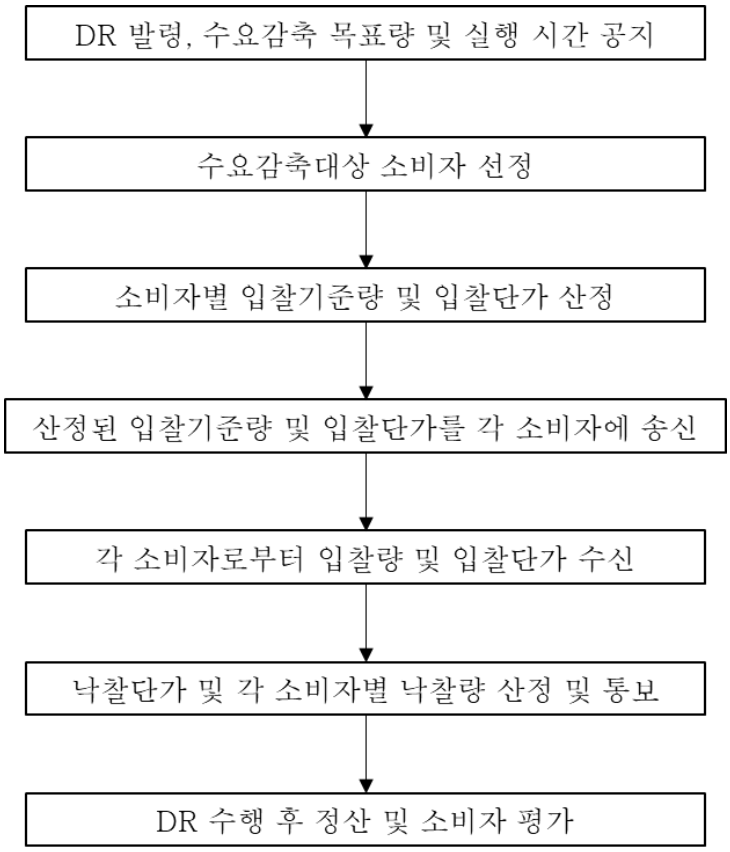
$$s.t. \quad \sum_{i\in N} x_i(v) \leq 1 \ and \ 0 \leq x_i(v) \leq 1 \qquad \forall i \in N, \quad \forall v \in V$$

따라서, 위 문제의 최적해는 다음과 같다.

$$x_i^* = \begin{cases} 1, & if \ \psi_i = \max_{j\in N} \psi_j \\ 0, & o/w \end{cases}, t_i^* = v_i x_i^*(v_i) - \int_{\underline{v_i}}^{v_i} x_i^*(u) du$$

제 2 절 입찰 제한 국민 DR 경매 모형

본 연구에서 제안하는 첫번째 방식의 경매 모형은 입찰 제한 국민 DR 경매 모형이다. 이일봉 외 2명 (2016)은 수요관리사업자와 DR 참여 고객들이 경매에 의해 전력 수요감축을 실행하는 전력 수요감축 경매시스템을 제안했다. 전력 수요감축 경매시스템의 절차는 [그림 2]와 같이 표현할 수 있다. 현재 문제 상황과의 차이점은 다음과 같다. 소비자는 감축량을 입찰량으로, 원하는 정산단가를 입찰단가로 입찰한다. 수요관리사업자는 과거 DR 참여실적이 우수한 순으로 수요감축대상 소비자를 선정하고, 소비자별 입찰량의 최댓값인 입찰기준량과 입찰단가의 최댓값인 입찰기준단가를 계산하여 소비자에게 고지한다.



[그림 2] 전력 수요감축 경매시스템

낙찰량은 신뢰도와 참여도 가중치에 따라 결정되고, 낙찰단가는 낙찰 받은 소비자들의 입찰단가 중 최댓값으로 정해진다. 이 때, 소비자는 자신의 가치를 솔직하게 입찰하지 않을 유인이 존재하는 상황이 발생할 수 있기 때문에 전력 수요감축 경매시스템은 유인 일치성 조건을 만족하지 않는다. 따라서, 본 연구에서 유인 일치성 조건을 만족하도록 변형한 입찰 제한 국민 DR 경매 모형을 제안하고자 한다.

경매 모형을 설명하기에 앞서, 경매 상황과 수요관리사업자 및 참여

고객에 대한 가정에 대한 설명은 다음과 같다. 국민 DR은 다중 수량 조달 경매 방식(multi-unit procurement auction)으로 이루어지며, 국민 DR 참여 고객들은 자신의 단위전기요금(b_i)만을 입찰하고, 수요관리사업자는 경매 메커니즘에 따라 낙찰된 고객과 낙찰단가를 결정하여 수요감축 목표량(Q)을 조달하고 고객들에게 정산금을 지급해야 한다. 고객들의 집합은 $N = \{1,2,\dots,n\}$ 이고, 모든 고객들은 경제적으로 합리적이라고 가정한다. 고객 i의 입찰 가격인 단위전기요금(원/kWh)은 b_i로 표현하고, 사적 정보로서 자신을 제외한 다른 고객의 입찰 가격은 정확하게 알 수 없고 확률 분포($f_i: [\underline{b}, \overline{b}]$)만 알려져 있다고 가정한다. 고객 i의 공적 정보로는 수요감축신뢰도를 나타내는 $r_i \in [0,1]$, 감축용량(kWh)을 나타내는 $q_i \in \mathbb{R}_+$가 있다.

경매 모형은 입찰 내용에 따른 경매 결과를 결정하는 두 가지 함수로 표현한다. 할당 함수(x)는 각 고객에게 낙찰될 확률을 결정하고, 비용 함수(t)는 각 고객에게 지급하는 정산금을 결정한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{x}: B \to \mathbb{R}_+$$

$$\mathrm{t}: B \to \mathbb{R}_+$$

고객 i의 효용은 정산금에서 낙찰량에 대한 전기요금을 제외한 값으로

정의한다. 고객 i의 기대 효용은 다음의 수식으로 표현한다.

$$U_i(b_i) = E_{B_{-i}}[t_i(b) - b_i x_i(b)] = T_i(b_i) - b_i X_i(b_i) \tag{3.1}$$

수요관리사업자는 고객들에게 지급하는 정산금 총합만큼의 비용이 발생한다. 수요관리사업자의 기대 비용은 다음의 수식으로 표현한다.

$$\Pi(\mathrm{x}, \mathrm{t}) = E_{\mathrm{B}}\left[\sum_{i \in N} t_i(b)\right] = \int_{\mathrm{B}} \sum_{i \in N} t_i(b) f(b) db \tag{3.2}$$

입찰 제한 국민 DR 경매 모형의 경매 규칙은 다음과 같다.

(i) 입찰에 참여하는 고객들의 집합을 $N' = \{i | r_i \geq R\} = \{1,2, \dots, n'\}$ 로 제한한다.

(ii) $b_1 \leq b_2 \leq \cdots \leq b_{n'}$이고, $\sum_{i=1}^{[i]-1} r_i q_i \leq Q \leq \sum_{i=1}^{[i]} r_i q_i$ 라 가정하자.

$$x_i = \begin{cases} r_i q_i, & if\ i \leq [i] \\ 0, & o/w \end{cases} \quad , \quad t_i = \min\{b_j | x_j = 0\} x_i = b_{[i]+1} x_i$$

정리 1. 입찰 제한 국민 DR 경매 모형은 유인 일치성 조건을 만족한다. 입찰 제한 국민 DR 경매 모형의 경매 규칙은 다음과 같다.

(증명)

어떤 고객 $j \in N'$ 에 대하여 자신의 가치(b_j)를 솔직하게 입찰하지 않을 유인이 존재하는지 살펴보자. (즉, b_j 를 입찰했을 때보다 $b_j{}'(\neq b_j)$을

입찰했을 때의 기대 효용이 더 큰 경우)

경우 1) $j < [i]$

만약 $b_j' < b_{[i]}$ 이면, b_j 를 입찰했을 때와 경매 결과가 동일하므로 b_j' 을 입찰할 유인이 존재하지 않는다. $b_{[i]} \leq b_j' \leq b_{[i]+1}$ 인 상황에서도 b_j 를 입찰했을 때와 경매 결과가 동일하다. 고객 j 까지 낙찰 받고, 낙찰 받지 못하는 고객들의 입찰가 중 최솟값은 그대로 $b_{[i]+1}$ 가 되기 때문에 b_j' 을 입찰할 유인이 존재하지 않는다. 만약 $b_j' > b_{[i]+1}$ 이면, 고객 j는 낙찰 받을 수 없기 때문에 기대 효용은 0으로 b_j 를 입찰했을 때보다 기대 효용이 낮아진다. 따라서, b_j'을 입찰할 유인이 존재하지 않는다.

경우 2) $j = [i]$

$b_j' \leq b_{[i]+1}$ 이면, b_j 를 입찰했을 때와 경매 결과가 동일하다. b_j 보다 높은 입찰가를 제시하더라도 낙찰 단가는 $b_{[i]+1}$ 로 고정되어 있으므로, b_j' 을 입찰할 유인이 존재하지 않는다. 만약 $b_j' > b_{[i]+1}$ 이면, 고객 j는 낙찰 받을 수 없기 때문에 기대 효용은 0으로 b_j 를 입찰했을 때보다 기대 효용이 낮아진다. 따라서, b_j'을 입찰할 유인이 존재하지 않는다.

경우 3) $j > [i]$

$b_j' \geq b_{[i]}$ 이면, b_j 를 입찰했을 때와 동일하게 낙찰 받지 못하므로 b_j' 을 입찰할 유인이 존재하지 않는다. 만약 $b_j' < b_{[i]}$ 일 경우에 낙찰 받을 수는

있지만 낙찰 단가가 b_j 보다 낮으므로 기대 효용이 음수가 된다. 따라서, b_j'을 입찰할 유인이 존재하지 않는다.

■

제 3 절 신뢰도를 고려한 최적 국민 DR 경매 모형

본 연구에서 제안하는 두번째 방식의 경매 모형은 신뢰도를 고려한 최적 국민 DR 경매 모형이다. Myerson (1981)의 최적 경매 메커니즘 정의에 따라 유인 일치성과 개인적 합리성 조건을 만족하도록 설계하였고, 국민 DR 상황은 다중 수량 조달 경매 방식을 따르므로 경매인의 기대 비용을 최소화하는 방향으로 목적함수를 설정하였다.

최적 경매 모형에서의 경매 상황과 수요관리사업자 및 참여 고객에 대한 가정 또한 입찰 제한 국민 DR 경매 모형과 동일하며, 최적 국민 DR 경매 모형 또한 입찰 내용에 따른 경매 결과를 결정하는 두 가지 함수로 표현한다. 할당 함수 (x) 는 각 고객에게 낙찰될 확률을 결정하고, 비용 함수 (t) 는 각 고객에게 지급하는 정산금을 결정한다. 수식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathrm{x}: B \rightarrow \mathbb{R}_+$$

$$\mathrm{t}: B \rightarrow \mathbb{R}_+$$

고객 i의 기대 효용과 수요관리사업자의 기대 비용은 각각 수식 (3.1)과 (3.2)로 표현한다.

$$U_i(b_i) = E_{B_{-i}}[t_i(b) - b_i x_i(b)] = T_i(b_i) - b_i X_i(b_i) \tag{3.1}$$

$$\Pi(\mathrm{x}, \mathrm{t}) = E_{\mathrm{B}}\left[\sum_{i \in N} t_i(b)\right] = \int_{\mathrm{B}} \sum_{i \in N} t_i(b) f(b) db \tag{3.2}$$

수식 (3.1)과 (3.2)를 이용하여 최적 경매 메커니즘의 최적화 문제를 나타내면 다음과 같다. 이 때, 참여 고객들의 수요감축신뢰도를 고려할 수 있도록 각 고객들의 정산금을 신뢰도로 나눈 값을 목적함수로 정의했다.

$$\min_{\mathrm{x,t}} \int_B \sum_{i \in N} \frac{t_i(b)}{r_i} f(b) db$$

$$s.t. \quad U_i(b_i; b_i) \geq U_i(b_i'; b_i) \quad \forall i \in N, \quad \forall b_i, b_i' \in [\underline{b}, \overline{b}] \tag{3.3}$$

$$U_i(b_i) \geq 0 \qquad \forall i \in N, \quad \forall b_i \in [\underline{b}, \overline{b}] \tag{3.4}$$

$$\sum_{i \in N} x_i(b) \geq Q \ and \ 0 \leq x_i(b) \leq r_i q_i \quad \forall i \in N, \quad \forall b \in B \tag{3.5}$$

수식 (3.3)과 (3.4)는 각각 참여 고객의 유인 일치성 조건과 개인적 합리성 조건을 의미하고, (3.5)는 수요감축 목표량(Q) 이상을 조달해야 하며 각 고객에게 낙찰하는 양은 실질감축용량($r_i q_i$)을 넘어설 수 없다는 제약식을 의미한다.

정리 2. 경매 메커니즘 (x,t)이 BIC (Bayesian incentive compatible)하다는 것은 다음의 두 조건과 동치이다.

$$\text{(i) } X_i(b_i) \text{ 는 } b_i \text{에 대하여 감소하는 함수이다.} \tag{3.6}$$

$$\text{(ii) } U_i(b_i) = U_i(\overline{b}) + \int_{b_i}^{\overline{b}} X_i(u)du \tag{3.7}$$

(증명)

(⇒) 경우 1) $b_i < b_i'$

$U_i(b_i; b_i) \geq U_i(b_i'; b_i) \Leftrightarrow T_i(b_i) - b_i X_i(b_i) \geq T_i(b_i') - b_i X_i(b_i')$

$U_i(b_i'; b_i') \geq U_i(b_i; b_i') \Leftrightarrow T_i(b_i') - b_i' X_i(b_i') \geq T_i(b_i) - b_i' X_i(b_i)$

위의 두 부등식을 이용하면 다음의 관계가 성립한다.

$(b_i' - b_i)X_i(b_i) \geq (b_i' - b_i)X_i(b_i')$

이 때, $b_i' - b_i > 0$이므로 $X_i(b_i) \geq X_i(b_i')$

경우 2) $b_i > b_i'$

$U_i(b_i; b_i) \geq U_i(b_i'; b_i) \Leftrightarrow T_i(b_i) - b_i X_i(b_i) \geq T_i(b_i') - b_i X_i(b_i')$

$U_i(b_i'; b_i') \geq U_i(b_i; b_i') \Leftrightarrow T_i(b_i') - b_i' X_i(b_i') \geq T_i(b_i) - b_i' X_i(b_i)$

위의 두 부등식을 이용하면 다음의 관계가 성립한다.

$(b_i' - b_i)X_i(b_i) \geq (b_i' - b_i)X_i(b_i')$

이 때, $b_i' - b_i < 0$이므로 $X_i(b_i) \leq X_i(b_i')$

따라서, (x,t)가 BIC하면 (3.6)을 만족한다.

또한, IC 조건을 만족하므로 참여 고객의 기대 효용은 다음과 같다.

$$U_i(b_i; b_i) = \max_{b_i' \in [\underline{b}, \overline{b}]} T_i(b_i') - b_i X_i(b_i')$$

이 때, $U_i(b_i; b_i)$는 b_i에 대해 볼록하므로, $\frac{\partial U_i}{\partial b_i} = -X_i(b_i)$이다.

다시 b_i에 대해 적분하면 (3.7) 식을 얻을 수 있다.

따라서, (x, t)가 BIC하면 (3.7)을 만족한다.

$$(\Longleftarrow)\ U_i(b_i'; b_i) = T_i(b_i') - b_i X_i(b_i')$$

$$= T_i(b_i') - b_i' X_i(b_i') + b_i' X_i(b_i') - b_i X_i(b_i')$$

$$= U_i(b_i'; b_i') + (b_i' - b_i) X_i(b_i')$$

이 때, 수식 (3.7)을 대입하면 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$U_i(b_i'; b_i) = U_i(\overline{b}) + \int_{b_i'}^{\overline{b}} X_i(u) du + (b_i' - b_i) X_i(b_i')$$

$$= U_i(\overline{b}) + \int_{b_i}^{\overline{b}} X_i(u) du + \int_{b_i'}^{b_i} X_i(u) du + (b_i' - b_i) X_i(b_i')$$

$$= U_i(b_i; b_i) + \int_{b_i'}^{b_i} X_i(u) du + (b_i' - b_i) X_i(b_i')$$

이 때, 수식 (3.6)에 의해 $\int_{b_i'}^{b_i} X_i(u) du + (b_i' - b_i) X_i(b_i') \leq 0$이므로,

$U_i(b_i; b_i) \geq U_i(b_i'; b_i)$을 만족한다.

■

정리 2을 이용하여 위에서 정의한 최적화 문제의 목적함수를 재구조화하는 과정은 다음과 같다.

$$\int_B \sum_{i\in N} \frac{t_i(b)}{r_i} f(b)db$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \int_b T_i(b) f(b) db \tag{3.8}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \int_{\underline{b}}^{\overline{b}} \left(b_i X_i(b_i) + \int_{b_i}^{\overline{b}} X_i(u) du \right) f_i(b_i) db_i \tag{3.9}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \left(\int_{\underline{b}}^{\overline{b}} b_i X_i(b_i) f_i(b_i) db_i + \int_{\underline{b}}^{\overline{b}} \int_{b_i}^{\overline{b}} X_i(u) du f_i(b_i) db_i \right) \tag{3.10}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \left(\int_{\underline{b}}^{\overline{b}} b_i X_i(b_i) f_i(b_i) db_i + \int_{\underline{b}}^{\overline{b}} \int_{\underline{b}}^{b_i} f_i(b) db X_i(u) du \right) \tag{3.11}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \left(\int_{\underline{b}}^{\overline{b}} b_i X_i(b_i) f_i(b_i) db_i + \int_{\underline{b}}^{\overline{b}} F_i(b_i) X_i(b_i) db_i \right) \tag{3.12}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \left(\int_{\underline{b}}^{\overline{b}} \left(b_i + \frac{F_i(b_i)}{f_i(b_i)} \right) X_i(b_i) f_i(b_i) db_i \right) \tag{3.13}$$

$$= \sum_{i\in N} \frac{1}{r_i} \left(\int_{\underline{b}}^{\overline{b}} \left(b_i + \frac{F_i(b_i)}{f_i(b_i)} \right) x_i(b_i) f(b) db \right) \tag{3.14}$$

수식 (3.1)와 정리 2에 의해 $T_i(b_i) = U_i(\overline{b}) + \int_{b_i}^{\overline{b}} X_i(u)du + b_i X_i(b_i)$ 로 나타낼 수 있으므로, 수식 (3.8)에 대입하면 수식 (3.9)와 같이 정리할 수 있다. 최종적으로 정리 2를 이용하여 목적함수를 수식 (3.14)와 같이 표현할 수 있고, 재구조화한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\max_{\mathrm{x}} \int_B \left[\sum_{i\in N} \frac{\psi_i(b_i)}{r_i} x_i(b) \right] f(b)db \,, where\ \psi_i(b_i) = b_i + \frac{F_i(b_i)}{f_i(b_i)}$$

$$s.t. \quad X_i(b_i)\ is\ decreasing\ in\ b_i \tag{3.16}$$

$$\sum_{i\in N} x_i(b) \geq Q\ and\ 0 \leq x_i(b) \leq r_i q_i \qquad \forall i \in N, \quad \forall b \in B \tag{3.17}$$

3장 1절과 같이, 균형성 가정 하에 위 최적화 문제의 해를 구할 수 있다. 균형성 가정 하에 (3.16) 제약식을 완화한 문제의 최적해를 구하면 다음과 같다.

가정 2. (균형성, Regularity) 모든 입찰자 i 에 대하여 $\psi_i(b_i)$ 가 b_i 에 대하여 감소하는 함수이다.

$\frac{\psi_1(b_1)}{r_1} \leq \frac{\psi_2(b_2)}{r_2} \leq \cdots \leq \frac{\psi_n(b_n)}{r_n}$ 이고, $\sum_{i=1}^{[i]-1} r_i q_i \leq Q \leq \sum_{i=1}^{[i]} r_i q_i$ 라 가정하자.

$$x_i^* = \begin{cases} r_i q_i & , \ if\ i < [i] \\ Q - \sum_{j=1}^{[i]-1} r_j q_j & , \ if\ i = [i], \\ 0 & , \ o/w \end{cases} \quad t_i^* = b_i x_i^* + \int_{b_i}^{\overline{b}} x_i(u) du$$

제 4 장 수치 분석

제 1 절 파라미터 설정

본 장에서는 국내 전력 소비 데이터를 활용하여 제안하는 경매 메커니즘의 성능을 비교하여 평가하고자 한다. [표 1]은 2021년 1월부터 2021년 12월까지의 서울특별시 가구 평균 월별 전력사용량 및 전기요금을 정리한 표이다. 이 데이터를 바탕으로 10,000 가구의 전력사용량 데이터를 생성하여 시뮬레이션 실험을 진행하였다. 시뮬레이션 실험에 사용한 파라미터는 아래의 [표 2]와 같다. 참여 고객의 전력사용량과 수요감축신뢰도는 균등 분포를 따른다고 가정하였다. 또한, 전력소비 감축 시에 냉장고, 김치 냉장고 등 연속적 가전제품은 제외하고 TV, 컴퓨터, 전등과 같은 단속적 기기만을 조정하기 때문에, 감축 용량은 단속적 기기 사용량만을 고려하였다.

현행 국민 DR 제도에 따르면, 국민 DR의 경우 1일 최대 1회 발령되고 오전 6시부터 오후 9시 사이 시간대 중 1시간 동안 지속된다. 또한, 지금까지 국민 DR은 오전 9시-10시 시간대에 가장 많이 발령되었다. 따라서, 본 실험에서는 매일 오전 9시-10시 시간대에 국민 DR을 수행한다고 가정하였다.

[표 1] 서울특별시 가구 평균 월별 전력 사용량 및 전기요금

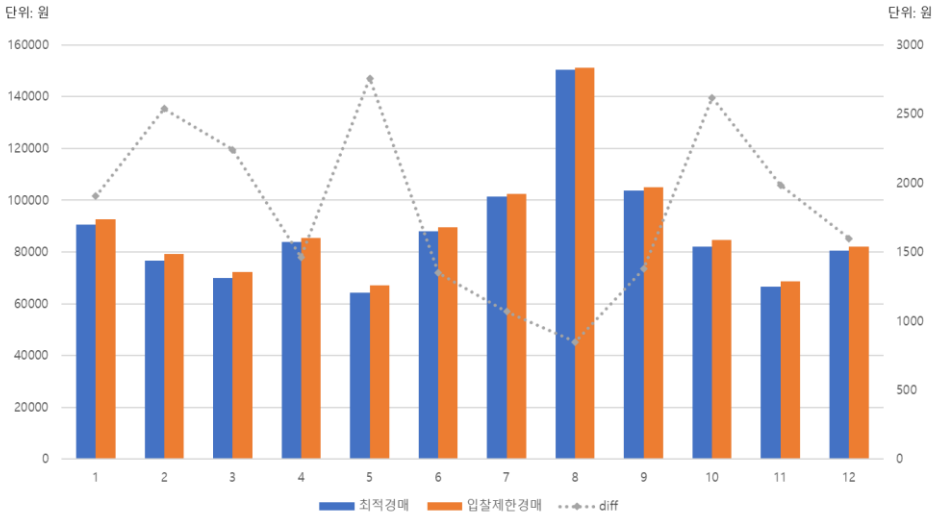
월	전력 사용량(kW)	전기요금(원)
1	257	30,216
2	245	27,807
3	211	21,305
4	216	22,312
5	206	20,498
6	218	22,594
7	270	30,938
8	362	47,660
9	259	28,247
10	218	23,838
11	217	23,609
12	225	25,115

[표 2] 파라미터 설정

$\boldsymbol{r_i}$	수요감축신뢰도, $r_i \sim Uniform(0,1)$
$\boldsymbol{q_i}$	감축용량(kWh), q_i=전기 사용량× 단속적 기기 사용 비율
$\boldsymbol{R}$	입찰 제한 국민 DR 경매 모형의 수요감축신뢰도 기준치, $R = 0.89$

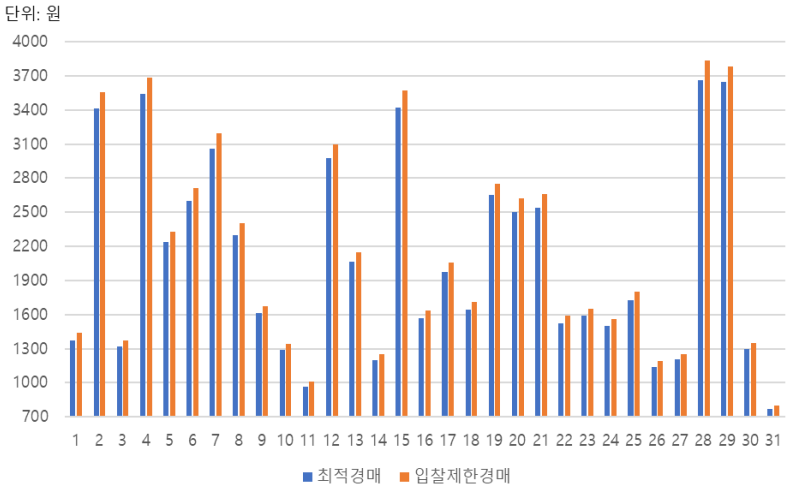
제 2 절 수요관리사업자의 기대 비용 비교 분석 결과

본 절에서는 3장에서 제안한 두 가지의 경매 모형에 따른 수요관리사업자의 기대 비용을 비교 분석하였다. [그림 3]은 4장 1절에서 설명한 시뮬레이션 실험을 통해 구한 결과로서, 수요관리사업자의 월별 기대 비용을 비교한 그래프이다. 1월부터 12월까지 모든 달에서 신뢰도를 고려한 최적 국민 DR 경매 모형에서의 수요관리사업자의 월별 기대 비용이 더 낮은 것을 확인할 수 있다. 두 모형의 월별 기대 비용은 평균적으로 1812.77원 차이가 발생했다. 또한, 대체적으로 전기 소비량이 많은 달에 두 모형 간의 차이가 적은 것을 확인할 수 있다.

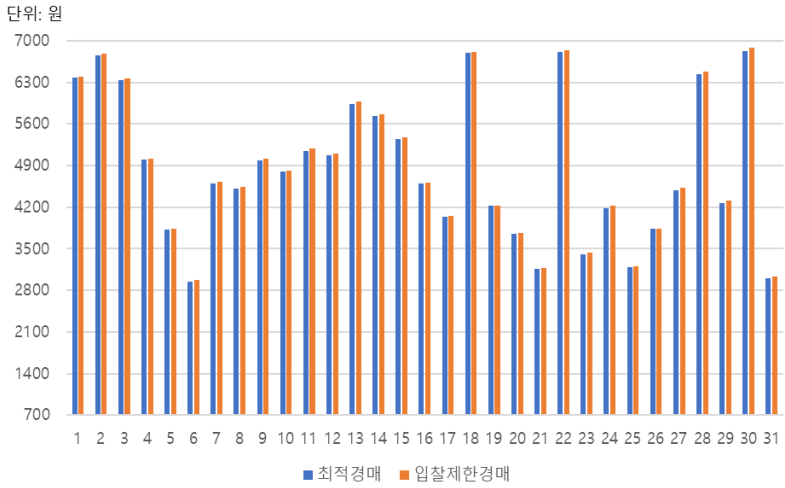


[그림 3] 수요관리사업자의 월별 기대 비용

이어서 전기 소비량이 가장 많은 달과 가장 적은 달의 일별 기대 비용을 비교하였다. [그림 4]는 전기 소비량이 가장 적은 달인 5월의 일별 기대 비용을 나타낸 그래프이고, [그림 5]는 전기 소비량이 가장 많은 달인 8월의 일별 기대 비용을 나타낸 그래프이다. 두 그래프의 추이를 보면, 5월과 8월의 일별 기대 비용의 최댓값과 최솟값의 차이는 8월이 더 크지만 두 모형 간의 차이는 5월이 더 크게 차이 나는 것을 확인할 수 있다. 1월부터 12월까지 모든 달에 대한 일별 기대 비용을 비교한 그래프는 Appendix-1에서 확인할 수 있다.



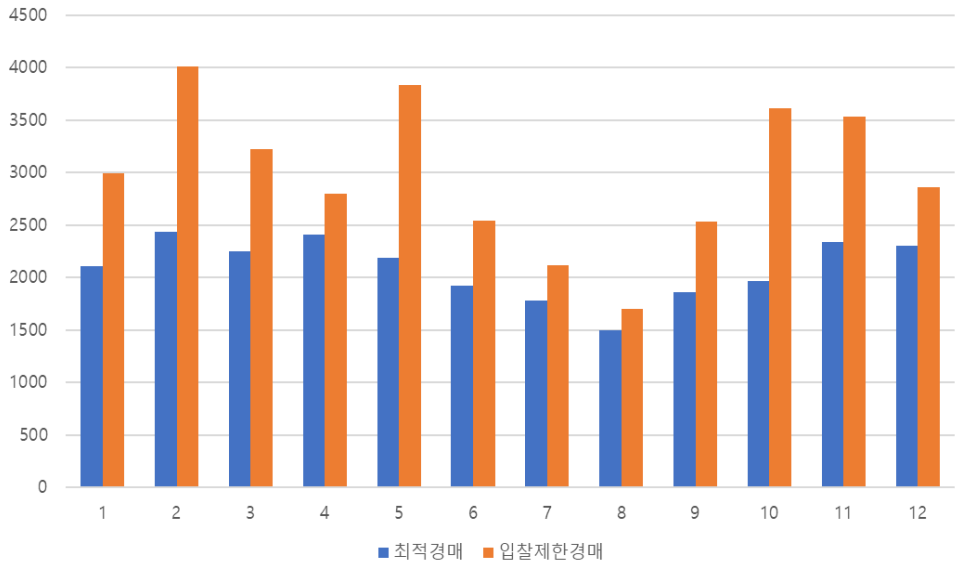
[그림 4] 수요관리사업자의 일별 기대 비용 (5월)



[그림 5] 수요관리사업자의 일별 기대 비용 (8월)

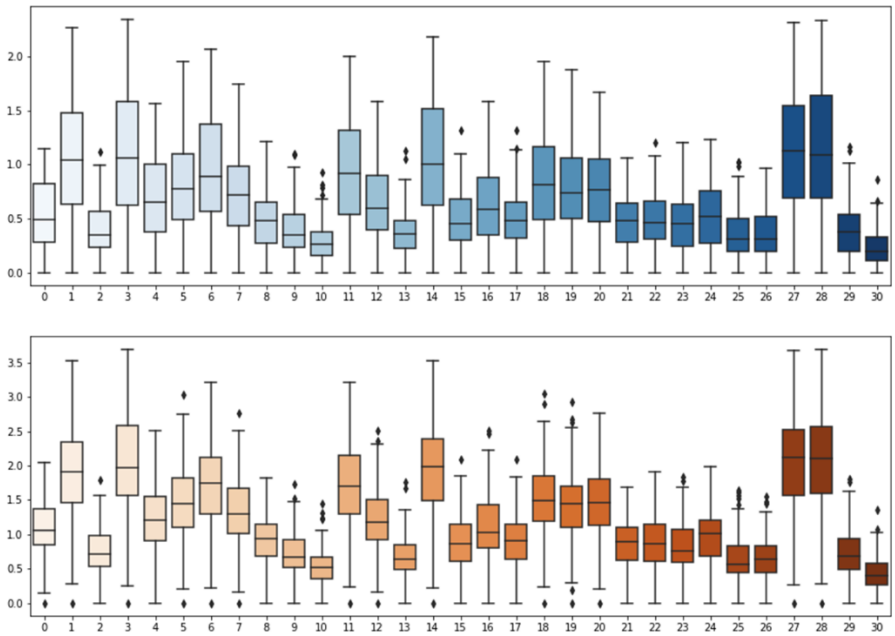
제 3 절 참여 고객들의 기대 효용 비교 분석 결과

본 절에서는 3장에서 제안한 두 가지의 경매 모형에 따른 참여 고객들의 기대 효용을 비교 분석하였다. [그림 6]은 4장 1절에서 설명한 시뮬레이션 실험을 통해 구한 결과로서, 참여 고객들의 월별 기대 효용의 총합을 비교한 그래프이다. 1월부터 12월까지 모든 달에서 입찰 제한 국민 DR 경매 모형에서의 참여 고객들의 기대 효용의 총합이 더 높은 것을 확인할 수 있다. 두 모형의 참여 고객들의 월별 기대 효용의 총합은 평균적으로 891.75원 차이가 발생했다. 이전 절에서 확인한 수요관리사업자의 월별 기대 비용 추세와 마찬가지로, 대체적으로 전기 소비량이 많은 달에 두 모형 간의 차이가 적은 것을 확인할 수 있다.

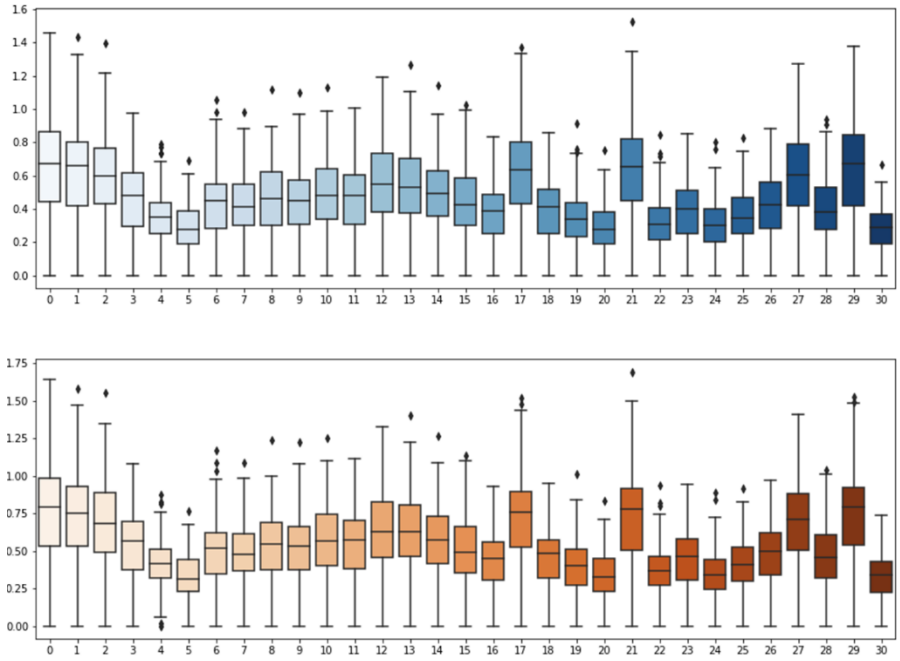


[그림 6] 참여 고객들의 월별 기대 효용

이어서 전기 소비량이 가장 많은 달과 가장 적은 달의 참여 고객들의 일별 기대 효용을 비교하였다. [그림 7]과 [그림 8]은 각각 전기 소비량이 가장 적은 달인 5월과 전기 소비량이 가장 많은 달인 8월의 일별 기대 효용을 비교하기 위해 참여 고객들의 기대 효용을 상자 그림으로 나타낸 것이다. 각 그림에서 위의 상자 그림이 최적 경매 모형, 아래의 상자 그림이 입찰 제한 경매 모형의 결과를 나타낸 것이다. 두 그림을 비교해보면, 5월과 8월 모두 두 모형의 그래프 추세가 비슷한 것을 확인할 수 있다. 다만, 8월은 두 모형의 변동성 또한 거의 동일하지만 5월은 최적 경매 방식을 따른 참여 고객들의 기대 효용의 변동성이 더 큰 것을 확인할 수 있다.



[그림 7] 참여 고객들의 일별 기대 효용 (5월)



[그림 8] 참여 고객들의 일별 기대 효용 (8월)

제 4 절 낙찰 받은 고객들의 평균 신뢰도 비교 분석 결과

본 절에서는 3장에서 제안한 두 가지의 경매 모형에 따라 낙찰 받은 고객들의 평균 신뢰도를 비교 분석하였다. [표 3]은 4장 1절에서 설명한 시뮬레이션 실험을 통해 구한 결과로서, 낙찰 받은 고객들의 월별 평균 신뢰도를 비교한 표이다. 1월부터 12월까지 모든 달에서 두 모형의 차이는 크지 않으나, 입찰 제한 국민 DR 경매 모형에 따라 낙찰 받은 고객들의 평균 신뢰도가 더 높게 형성되어 있는 것을 확인할 수 있다.

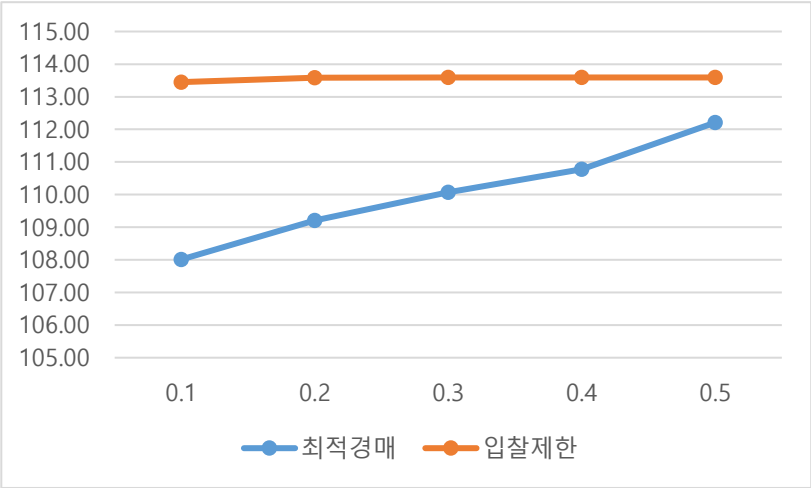
[표 3] 낙찰 받은 고객들의 월별 평균 신뢰도

월	최적 경매	입찰 제한 경매
1	0.9345	0.9466
2	0.9336	0.9476
3	0.9290	0.9483
4	0.9376	0.9522
5	0.9246	0.9434
6	0.9404	0.9489
7	0.9399	0.9451
8	0.9463	0.9505
9	0.9357	0.9409
10	0.9306	0.9438
11	0.9387	0.9488
12	0.9376	0.9499

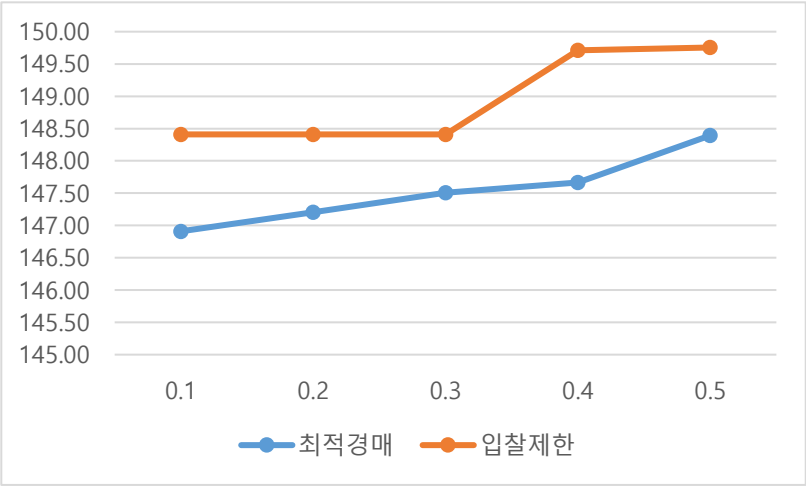
제 5 절 수요감축목표량 변화에 따른 민감도 분석 결과

본 절에서는 수요감축목표량 변화에 따라 두 경매 모형에서의 낙찰단가와 평균 신뢰도의 변화를 비교 분석하였다. 기존 시뮬레이션 실험에서는 수요감축목표량을 총 감축용량의 10%로 설정하였으나, 본 절에서는 수요감축목표량이 총 감축용량의 10%씩 증가시키면서 민감도 분석을 수행하였다. 총 감축용량의 50%를 초과하여 수요감축목표량을 설정할 시에 두 경매 모형 모두 경매 결과를 구할 수 없기 때문에 50%까지만 시뮬레이션 실험을 진행하였다.

[그림 9]와 [그림 10]은 5월과 8월의 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰단가를 비교한 결과이다. 5월을 비롯한 대부분의 달에서 입찰 제한 경매 방식은 낙찰단가가 비슷하게 유지되는 반면에, 최적 경매 방식은 꾸준히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 8월의 경우, 입찰 제한 경매 방식의 낙찰단가가 상대적으로 큰 폭으로 증가하는 것을 확인할 수 있다.



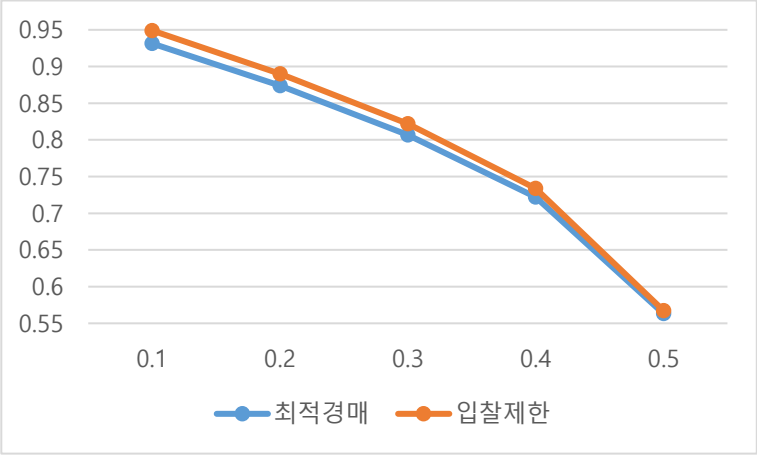
[그림 9] 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰 단가 (5월)



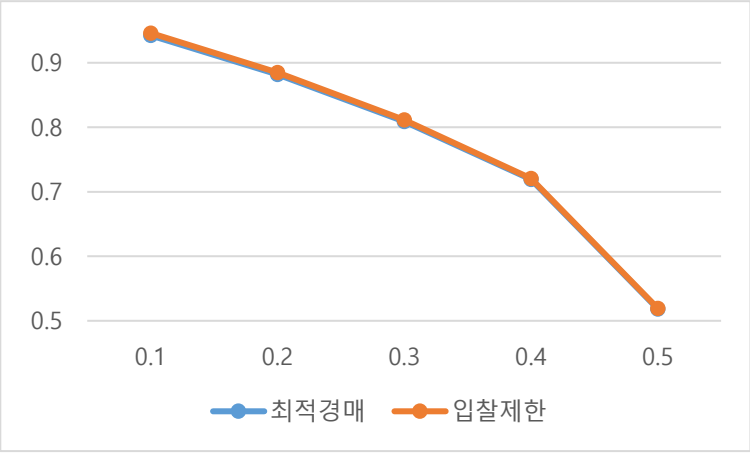
[그림 10] 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰 단가 (8월)

[그림 11]과 [그림 12]는 5월과 8월의 수요감축목표량 변화에 따른 낙찰 받은 고객들의 평균 신뢰도를 비교한 결과이다. 전기 소비량이 많은 8월에는 5월에 비해 두 모형 간의 차이가 거의 없는 것을 확인할 수 있다.

전체적으로 결과를 분석해보았을 때, 모든 달에서 두 모형을 통해 낙찰받은 고객들의 평균 신뢰도는 수요감축목표량이 증가함에 따라 꾸준하게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 특히, 감축 용량의 40% 이상을 감축하게 되면 큰 폭으로 평균 신뢰도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.



[그림 11] 수요감축목표량 변화에 따른 평균 신뢰도 (5월)



[그림 12] 수요감축목표량 변화에 따른 평균 신뢰도 (8월)

제 5 장 결론

본 논문에서는 현재 국민 DR 상황을 다중 수량 조달 경매 방식으로 모형화하고, 참여 고객들의 신뢰도를 고려한 두 가지의 경매 메커니즘 모형을 제안하였다. 신뢰도를 고려한 최적 국민 DR 경매 모형은 참여 고객의 수요감축신뢰도를 고려한 수요관리사업자의 기대 비용을 최소화하는 최적의 할당 함수 및 비용 함수를 제시하였으며, 입찰 제한 국민 DR 경매 모형은 참여 고객들의 신뢰도를 바탕으로 입찰에 참여하는 고객 집합을 제한하는 방식을 통해 높은 신뢰도를 보장하는 경매 결과를 제시하였다. 따라서, 국민 DR 참여 고객의 감축 이행률을 보장할 수 있고, 수요관리사업자의 기대 비용을 절감할 수 있는 방안을 제시하는 데에 기여할 수 있다.

또한, 본 논문에서 제안한 두 모형 모두 유인 일치성과 개인적 합리성 조건을 만족하는 것을 증명하였다. 이는 현재 국민 DR 참여 고객이 느끼는 효용에 비해 정산금이 적다고 판단되는 문제점을 해결하는 데에 기여할 수 있다. 참여 고객은 본인이 느끼는 가치에 따라 입찰 내용을 결정하기 때문에 경매 결과의 합리성을 이해할 수 있고, 시장의 투명성 또한 증가할 수 있다. 따라서, 본 논문에서 제안한 두 경매 모형은 국민 DR을 활성화할 수 있는 제도적 방안을 제시하여 전력계통 안정화 및 효율 증대에 기여할 수 있다.

한편, 본 논문에서는 국내 전력 소비 데이터를 활용한 시뮬레이션 실험을 통해 두 모형의 결과를 비교하였으나, 실제 고객들의 전력 소비 데이터와는 차이가 있을 것이다. 추후 연구에서는 주택용 AMI 데이터를 통해 실제 고객들의 전력 소비 패턴을 파악하고, 수요감축신뢰도 또한 실제 고객들의 전력 소비 행태에 따라 결정되는 값으로 설정하여 분석의 현실성을 높이고자 한다. 또한, 현재 국민 DR은 의무 감축 DR로 발령되고 있으나 추후에는 경제성 DR까지 확장될 가능성이 높다. 그에 따라 추후 연구에서는 경제성 DR 상황으로 모형을 확장하여 참여 주체에 전력거래소를 포함하여 사회 전체적인 후생을 비교하고자 한다.

참고문헌

Haider, H. T., See, O. H., & Elmenreich, W. (2016). A review of residential demand response of smart grid. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 59, pp. 166–178). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.016

Hyungok, L., Seunghun, O., Sungchul, K., Byungtak ETRI, L., & Energy 요 약, P. (2022). *A Residential DR through Data*. www.dbpia.co.kr

Kamyab, F., Amini, M., Sheykhha, S., Hasanpour, M., & Jalali, M. M. (2016). Demand Response Program in Smart Grid Using Supply Function Bidding Mechanism. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *7*(3), 1277–1284. https://doi.org/10.1109/TSG.2015.2430364

Maskin, E., & Riley, J. (2000). Optimal multi-unit auctions. *International Library of Critical Writings in Economics*, *113*, 5–29.

Mohsenzadeh, A., Pang, C., & Haghifam, M. R. (2018). Determining Optimal Forming of Flexible Microgrids in the Presence of Demand Response in Smart Distribution Systems. *IEEE Systems Journal*, *12*(4), 3315–3323. https://doi.org/10.1109/JSYST.2017.2739640

Myerson, R. B. (1981). Optimal Auction Design. In *Operations Research* (Vol. 6, Issue 1). https://www.jstor.org/stable/3689266

Nekouei, E., Alpcan, T., & Chattopadhyay, D. (2015). Game-theoretic frameworks for demand response in electricity markets. *IEEE Transactions on Smart Grid*, *6*(2), 748–758.

https://doi.org/10.1109/TSG.2014.2367494

Oconnell, N., Pinson, P., Madsen, H., & Omalley, M. (2014). Benefits and challenges of electrical demand response: A critical review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 39, pp. 686–699). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.07.098

Ruzbahani, H. M., & Karimipour, H. (2018). Optimal incentive-based demand response management of smart households. *Conference Record - Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference*, *2018-May*, 1–7. https://doi.org/10.1109/ICPS.2018.8369971

Torriti, J., Hassan, M. G., & Leach, M. (2010). Demand response experience in Europe: Policies, programmes and implementation. *Energy*, *35*(4), 1575–1583. https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.05.021

Wang, F., Ge, X., Li, K., & Mi, Z. (2019). Day-Ahead Market Optimal Bidding Strategy and Quantitative Compensation Mechanism Design for Load Aggregator Engaging Demand Response. *IEEE Transactions on Industry Applications*, *55*(6), 5564–5573. https://doi.org/10.1109/TIA.2019.2936183

Yan, X., Ozturk, Y., Hu, Z., & Song, Y. (2018). A review on price-driven residential demand response. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 96, pp. 411–419). Elsevier Ltd. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.003

이일봉, 송혜자, & 김혜영. (2016). *전력 수요감축 경매시스템 및 경매방법* (Patent No. 101672408B1). 주식회사 우암코퍼레이션.

Abstract

Auction-Based Mechanisms for Residential Demand Response

Jeongeen Hong
Department of Industrial Engineering
The Graduate School
Seoul National University

As the size of the demand response (DR) resource trading market grows, the KPX implemented a residential DR pilot project to expand its target from large-scale industrial electricity consumers to small-scale electricity consumers such as houses and shops. This paper models the current residential DR situation in a multi-unit procurement auction method, and proposes two auction-based mechanisms that consider the reliability of participating customers. The first model is the optimal auction mechanism model, which can obtain the optimal allocation function and cost function by solving the demand response aggregator's optimization problem considering the reliability of participating customers. The second model is an auction mechanism that limits the number of customers who participate in the auction based on reliability. Both mechanisms proved to satisfy the conditions of incentive compatibility and individual

rationality, and through a simulation experiment using domestic electricity consumption data, the expected cost of demand response aggregator and the expected utility of participating customers according to the two auction mechanisms.

Keywords: Demand response, Multi-unit procurement auction, Optimal auction, Mechanism design

Student Number: 2021-24543

부록 – 수요관리사업자의 일별 기대 비용 비교

(1월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	2890.89	2963.40
2	4009.37	4088.63
3	1381.58	1406.92
4	2495.96	2550.16
5	1926.56	1963.52
6	1755.29	1783.97
7	2046.20	2094.47
8	2638.37	2690.25
9	2800.44	2862.94
10	3343.94	3426.53
11	2923.22	2980.26
12	3859.69	3945.18
13	2142.79	2187.79
14	4558.08	4655.09
15	1504.23	1544.44
16	3814.43	3877.15
17	2889.12	2958.26
18	3416.65	3495.60
19	1924.60	1965.17
20	2124.28	2169.96
21	4265.01	4368.14
22	4883.39	4990.83
23	2517.45	2561.57
24	3892.54	3972.73
25	4538.64	4633.92
26	4604.78	4698.62
27	1685.93	1722.30
28	1557.73	1582.38
29	2019.55	2061.20
30	4523.70	4603.67
31	1778.52	1813.69

(2월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	2715.03	2812.84
2	1357.64	1403.52
3	3147.41	3240.41
4	2746.22	2832.38
5	2681.04	2766.61
6	2387.93	2466.48
7	1971.89	2033.29
8	3349.82	3453.61
9	2309.08	2385.01
10	2152.18	2222.02
11	3389.33	3504.31
12	3063.53	3175.55
13	1716.69	1774.84
14	3015.40	3139.06
15	1915.16	1973.45
16	3915.55	4047.56
17	4164.80	4307.06
18	2946.51	3033.28
19	4155.75	4299.66
20	1551.50	1599.69
21	2974.38	3061.06
22	1517.41	1562.24
23	2705.78	2784.35
24	1618.55	1676.59
25	1713.85	1765.62
26	3311.16	3424.16
27	2063.14	2133.31
28	1638.76	1701.71
29	2040.25	2100.77
30	2462.65	2555.51

(3월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	2540.94	2636.96
2	3042.13	3137.04
3	1686.13	1742.96
4	2421.01	2484.02
5	3632.22	3756.76
6	3621.23	3738.32
7	1168.46	1205.68
8	1426.00	1478.72
9	945.69	977.65
10	2191.02	2262.66
11	874.16	905.78
12	2218.49	2281.23
13	2843.53	2933.99
14	1675.17	1726.51
15	2937.75	3035.75
16	2669.51	2749.68
17	870.00	895.71
18	2584.99	2679.14
19	1601.51	1650.84
20	2094.41	2164.49
21	1685.15	1734.21
22	2983.68	3076.05
23	2209.57	2280.94
24	1281.79	1318.78
25	2529.21	2610.01
26	3261.57	3364.00
27	1761.42	1821.36
28	1481.26	1525.19
29	2023.03	2083.07
30	3767.66	3875.11
31	3909.34	4046.76

(4월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	4277.36	4379.14
2	2845.20	2896.33
3	4314.29	4395.93
4	3417.33	3461.13
5	3357.99	3420.58
6	1713.27	1750.63
7	4326.98	4397.99
8	1004.68	1020.46
9	1820.75	1848.06
10	2458.11	2510.13
11	3649.74	3716.01
12	1638.85	1670.92
13	3944.99	4004.45
14	4345.80	4408.40
15	1539.25	1561.90
16	3017.05	3070.49
17	996.82	1014.56
18	2286.37	2337.55
19	1129.55	1151.53
20	4254.94	4320.34
21	2478.79	2533.55
22	4207.49	4261.75
23	3659.64	3725.01
24	3949.61	4003.83
25	1579.12	1605.27
26	1211.25	1226.57
27	3023.40	3078.40
28	1544.64	1573.32
29	3470.51	3542.31
30	2389.98	2430.84

(5월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	1371.50	1436.66
2	3411.33	3559.34
3	1318.37	1374.11
4	3539.03	3682.45
5	2235.07	2329.98
6	2600.94	2710.99
7	3059.24	3195.42
8	2296.80	2407.68
9	1610.24	1673.13
10	1289.84	1344.44
11	963.86	1008.12
12	2979.45	3098.45
13	2065.89	2148.03
14	1199.00	1248.09
15	3419.37	3570.64
16	1566.73	1636.88
17	1976.62	2054.92
18	1641.33	1713.46
19	2649.18	2750.63
20	2505.18	2624.48
21	2540.55	2659.79
22	1526.29	1589.14
23	1588.52	1653.59
24	1502.62	1561.27
25	1723.81	1799.80
26	1135.22	1193.46
27	1204.31	1255.04
28	3664.95	3834.83
29	3645.62	3785.97
30	1297.38	1352.39
31	766.83	799.59

(6월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	4087.98	4138.84
2	2163.63	2191.98
3	3861.28	3932.44
4	1140.95	1159.61
5	1405.87	1433.86
6	3069.04	3123.66
7	2827.26	2879.47
8	2463.59	2502.37
9	2164.73	2202.00
10	3144.83	3186.19
11	2524.11	2556.82
12	3530.11	3582.48
13	2785.01	2830.92
14	3007.69	3045.08
15	3219.67	3277.46
16	4423.39	4490.73
17	3822.12	3875.48
18	2419.34	2452.31
19	4015.20	4079.49
20	3842.51	3895.87
21	1198.39	1222.33
22	3479.05	3531.26
23	3778.96	3838.29
24	3543.50	3589.79
25	3456.53	3505.32
26	2864.50	2907.34
27	1435.30	1453.54
28	4316.43	4402.45
29	2398.71	2427.62
30	1745.90	1769.25

(7월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	1778.45	1799.20
2	4223.51	4281.76
3	3037.30	3077.84
4	4047.61	4096.80
5	4922.98	4957.32
6	3400.09	3430.70
7	3268.26	3298.54
8	1770.44	1783.73
9	2450.08	2470.89
10	3255.08	3280.22
11	3873.34	3914.85
12	4319.28	4365.45
13	2853.53	2878.13
14	1747.35	1773.87
15	2535.93	2557.11
16	4670.84	4722.23
17	2265.68	2284.47
18	3110.10	3151.71
19	4754.40	4811.44
20	1605.75	1632.22
21	3617.48	3651.60
22	4831.23	4876.32
23	2307.28	2332.81
24	3429.75	3452.21
25	4679.39	4744.72
26	1977.37	2007.73
27	3339.46	3362.90
28	4116.23	4162.02
29	3848.52	3879.22
30	3136.74	3181.25
31	2239.19	2263.42

(8월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	6381.65	6398.66
2	6755.76	6787.31
3	6346.99	6374.51
4	4999.83	5024.09
5	3822.68	3835.26
6	2941.80	2972.97
7	4603.05	4632.27
8	4516.73	4542.69
9	4990.46	5014.55
10	4796.78	4811.86
11	5140.12	5188.80
12	5072.48	5105.32
13	5936.49	5984.03
14	5732.50	5770.93
15	5342.59	5376.88
16	4603.70	4619.16
17	4039.92	4053.29
18	6798.43	6817.32
19	4220.68	4231.23
20	3754.71	3768.81
21	3166.96	3174.89
22	6819.71	6843.08
23	3411.81	3435.07
24	4185.84	4219.80
25	3195.75	3208.00
26	3830.98	3841.25
27	4478.48	4531.24
28	6441.03	6482.62
29	4266.27	4306.62
30	6824.26	6893.43
31	3007.20	3028.95

(9월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	1608.13	1644.43
2	3397.99	3429.13
3	3384.29	3436.43
4	2054.17	2080.26
5	2086.52	2114.07
6	2384.55	2405.76
7	3075.41	3115.10
8	2507.41	2546.54
9	1884.05	1914.49
10	2838.56	2879.82
11	2181.89	2212.25
12	4762.58	4827.64
13	5035.84	5121.81
14	1748.01	1772.44
15	4111.16	4152.96
16	3687.87	3742.10
17	4852.21	4903.79
18	4023.50	4075.76
19	3582.72	3630.17
20	4140.39	4186.91
21	2954.05	3002.70
22	4130.96	4186.95
23	4590.52	4654.07
24	3279.01	3313.09
25	5015.37	5071.06
26	4514.97	4566.45
27	5165.80	5233.41
28	2183.30	2212.76
29	3453.97	3514.91
30	5052.49	5117.77

(10월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	3474.34	3603.91
2	976.07	1009.71
3	2999.82	3109.17
4	3405.45	3499.58
5	2550.29	2626.38
6	1649.65	1700.41
7	1536.31	1590.57
8	3435.87	3548.24
9	1456.65	1499.87
10	1213.67	1253.72
11	3194.10	3287.21
12	4110.83	4251.29
13	925.29	953.68
14	2624.84	2708.02
15	3641.45	3765.72
16	2936.76	3044.79
17	3308.36	3402.09
18	1875.87	1934.14
19	3989.43	4116.34
20	3308.12	3402.56
21	2710.19	2792.41
22	1386.95	1430.51
23	2161.10	2222.32
24	3174.54	3263.52
25	2378.06	2456.94
26	2365.67	2445.07
27	2969.14	3073.30
28	2618.09	2709.14
29	3096.48	3193.66
30	2899.18	2983.93
31	3602.41	3714.41

(11월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	1451.85	1512.51
2	965.32	993.12
3	2333.35	2402.24
4	3126.60	3215.27
5	2190.13	2259.84
6	2395.41	2461.29
7	932.50	967.87
8	2382.37	2459.97
9	3801.32	3915.88
10	3520.66	3612.69
11	3154.55	3252.20
12	1220.91	1254.84
13	3678.03	3796.94
14	3530.21	3619.89
15	1397.78	1445.60
16	2861.45	2951.09
17	964.09	994.96
18	1249.41	1284.74
19	1862.68	1913.72
20	1389.00	1435.76
21	3259.66	3354.99
22	3422.27	3529.64
23	1954.52	2006.89
24	1885.59	1933.19
25	1244.23	1281.22
26	1148.43	1185.20
27	3089.86	3194.13
28	2747.18	2818.47
29	1089.21	1118.57
30	2368.64	2430.61

(12월)	최적 경매	입찰 제한 경매
1	1510.04	1556.49
2	3463.41	3540.39
3	1847.04	1877.08
4	2773.51	2826.75
5	1031.96	1056.85
6	4064.47	4155.02
7	4015.05	4103.60
8	1091.58	1121.68
9	4215.28	4292.78
10	1450.98	1480.48
11	1954.17	1996.18
12	3028.52	3073.94
13	4172.10	4266.68
14	3834.87	3920.45
15	1012.38	1032.63
16	2735.52	2793.61
17	2853.08	2912.87
18	2619.12	2663.32
19	3564.23	3626.07
20	1532.05	1569.06
21	3550.81	3613.67
22	1037.17	1061.49
23	1437.41	1460.36
24	1370.11	1395.36
25	2016.84	2063.53
26	3261.14	3332.22
27	2577.33	2617.64
28	3737.27	3800.79
29	1963.01	2001.38
30	3443.14	3496.52
31	3351.37	3404.12