

# VCG 경매 기반 개인 전력 거래를 위한 ARIMA 모델 이용 지역 전력 수요량 예측 기법

이정화\*, 이충현\*, 조성래<sup>o</sup>

## A Study on the Local Power Demand Prediction through the ARIMA Model for VCG Auction Based Peer-to-Peer Power Transaction

Jeonghwa Lee\*, Chunghyun Lee\*, Sungrae Cho<sup>o</sup>

### 요 약

신재생 에너지 생산력의 향상과 설비 보급 확대 및 ESS (Energy Storage System) 기술의 발전과 함께 신재생 에너지를 직접 사용하고 남은 전력을 소비시장에 판매하여 이익을 창출할 수 있는 소비자인 에너지 프로슈머 개념이 등장하였다. 따라서 기존 중앙 집중형 전력 공급 방식 이외에 Peer-to-Peer 방식의 거래를 통한 전력 공급 기법의 도입이 요구되기에 본 논문은 개인 간 소규모 전력 거래 시스템에서 수요 예측에 기반한 Vickrey-Clarke-Groves 경매 프로세스를 연구하였다. 또한, 전력거래소에서 제공하는 제주 지역 전력 수요 데이터에 대해 ARIMA 모델을 적용하여 수요를 예측하고 결과를 분석하였다. 실험 결과 실제 데이터와 비교했을 때, 예측 데이터는 2.213%의 평균 절대 백분율 오차를 가지며 ARIMA 모델 기반 지역 전력 수요 예측 기법이 계절성과 수요 패턴의 유사성이 있는 전력 수요 데이터의 특성에 적합하다는 것을 검증하였다.

**Key Words** : Smartgrid, Game Theory, Time Series Prediction, VCG Auction, Renewable Energy

### ABSTRACT

With the improvement of renewable energy productivity and development of ESS (Energy Storage System) technology, the concept of an energy prosumer has emerged. Therefore, in addition to the existing centralized power supply method, the Peer-to-Peer transaction scheme is required. In this study, We investigated the power transaction scheme through the prediction based Vickrey-Clarke-Groves (VCG) Auction in peer-to-peer power transaction system and the ARIMA model-based time series demand data analysis technique. Experimental results using KPX public data verified that the actual data and prediction data have a mean absolute percentage error of 2.213%, and that the ARIMA model-based regional power demand prediction technique is suitable for power demand time series data.

※ 본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제(R20XO02-15) 지원 및 중앙대학교 관리로 수행되었습니다.

※ 본 연구는 한국전력공사의 2020년 선정 기초연구개발 과제 연구비에 의해 지원되었음.(과제번호 : R20XO02-15)

• First Author : Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, jeonghwa@uclab.re.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, srcho@cau.ac.kr, 종신회원

\* Chung-Ang University Department of Computer Science and Engineering, chlee@uclab.re.kr, 학생회원

논문번호 : 202201-002-C-RN (S-21-0393), Received December 31, 2021; Revised February 21, 2022; Accepted March 23, 2022

## I. 서론

기존의 전력 산업은 석탄, LNG, 원자력 등 화력 발전소가 중심이 되는 중앙 집중형 공급 방식으로 전력을 공급해왔다. 그러나 온실가스 감축을 위하여 탄소 배출이 높은 에너지 분야에서 친환경 연료 전환, 분산형 발전, 에너지 효율화의 노력이 필요하게 되었고 ‘에너지 신산업’이 주목받게 되었다. 국내의 ‘2030 에너지 신산업 확산전략’에서는 2030년까지 발전 비중의 20%를 신재생에너지로 달성한다는 정부 목표를 발표하는 등 에너지 시장에서 신재생에너지의 중요성은 날로 증가하고 있다. 태양광 발전, 바이오에너지발전 등 신재생 에너지 생산력의 향상과 설비의 보급 확대 및 ESS (Energy Storage System) 기술의 발전에 따라 에너지 프로슈머 개념이 함께 등장하였다. 에너지 프로슈머는 생산자(Producer)와 소비자(Consumer)가 결합한 것으로 생산한 신재생에너지를 직접 사용하고 남은 전력을 소비시장에 판매하여 이익을 창출할 수 있는 소비자를 의미한다. ‘2030년 신산업 정책 방향’에서는 에너지 프로슈머 전력 시장 창출을 목적으로 에너지 프로슈머 전력 시장(분산자원 중개 시장) 개설 및 다양한 유형의 에너지 프로슈머 사업을 국내 전역으로 확대하여 총 발전량의 12.8% 규모까지 상향시키는 목표를 설정하는 등 에너지 프로슈머의 역할이 강조하였다. 또한 ‘신·재생에너지 발전전력의 제3차간 전력거래계약에 관한 지침’의 시행과 같이 관련 법률의 제정으로 개인 간의 거래를 통해 전력을 공급받는 새로운 형태의 공급 방식이 현실화되었다. 이에 따라 국내 전력 시장의 공급 방식의 변화가 발생하였다. 중앙집중형 공급을 통한 일괄적 전력 공급 및 요금 지불을 하는 기존 방식 이외에 개인이 생산한 신재생에너지에 대해 Peer-to-Peer 방식의 개인 간 소규모 전력 거래를 통한 공급이 차지하는 비중은 점차 증가할 것으로 예상된다.

정책의 변화 및 재생에너지원 생산 기술의 발전에 따라 분산형 에너지 자원에 대한 Peer-to-Peer 방식 판매자와 구매자 할당 프로세스 확립과 같이 변화하는 전력 시장에 맞는 거래 기법 도입이 요구된다.

본 논문에서는 개인 간 전력 거래에서의 경매 기법 도입을 연구하였으며 특히, 진실성 보장이라는 특성을 갖는 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 경매 기반 거래 프로세스를 설명한다. 또한, 경매 기반 소규모 전력 거래에 참여할 때 프로슈머의 판매량 설정을 위해 과거의 전력 수요 데이터에 기반하여 향후 수요를 예측을 통해 적합한 판매량을 결정할 수 있는 시계열 데이

터 분석 기반 수요 예측 기법을 제안한다. 이후 전력 연구원에서 제공하는 전력 수요 정보 공공데이터를 통한 실험을 통해 시계열 데이터 분석 기반 예측이 계절성이 있는 전력 수요 데이터의 특성에 적합한 것을 검증하였다.

본 논문의 나머지는 다음과 같이 구성된다. II장에서 개인 간 전력 거래와 전력 수요 예측에 관한 기존 관련 연구를 설명한다. III장에서 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 방식 경매의 개인 간 전력 거래 적용 가능성에 대해 설명한다. 다음 IV장에서는 시계열 데이터 분석 기법 중 ARIMA 모형을 적용하여 데이터 전처리, 평가 지표 등을 포함한 예측 기법을 설명하고 V장에서 제안 기법을 제주 지역 전력 수요데이터에 적용한 실험 결과를 제시한다. 마지막으로 VI장에서 결론을 설명하고 마무리한다.

## II. 관련 연구

### 2.1 에너지 프로슈머의 전력 거래 관련 연구

과거 2000년대 이전의 전력 시장은 대규모발전-송전-배전 형태인 중앙 집중형 공급 방식의 전력 계통위주로 구성되었으나, 최근에는 부하 소비 지역 중심으로 소규모 발전원을 통해 전력을 제공하는 분산 발전 방식 역시 비중이 점차 증가하고 있다. 이에 따라 에너지 프로슈머의 전력 거래에 대한 연구 및 사업이 다수 수행되었다. 해외의 사례로 2000년대 중후반 전력망 내 P2P 거래를 가능하게 하는 방안에 대한 논의가 미국과 유럽에서 선행되었다.<sup>[1]</sup> 전력망 내 P2P 거래로 프로슈머와 소비자 사이의 직접 에너지 거래를 하던 계통을 통해 구매하는 전력보다 낮은 단가의 구매가 가능하다. 따라서 2010년대에 에너지 시장이 자유화된 지역에서 개인 간 전력 거래 모델이 실제 비즈니스 형태를 갖추고 운영되었다. P2P 전력 거래 플랫폼으로는 영국의 피클로, 네덜란드의 반데브론이 주요 개발 사례다.<sup>[2]</sup> 피클로는 영국에서 2015년 에너지 기후 변화부의 지원을 받아 진행된 시범 사업으로 선호하는 전력공급자와 소비자 간 연결을 지원하는 소프트웨어를 개발한 사례이다. 네덜란드의 반데브론은 2014년부터 재생에너지 직접 거래 시장을 개설한 것으로 풍력 터빈을 운영하는 독립 생산자로부터 직접 전력을 구매할 수 있고 기존 전력회사는 이 거래에 개입하지 않는 특성을 가진다. 국내의 전력 거래 연구 및 사업 사례로 산업통상자원부는 2016년에 소규모 신·재생에너지발전전력 등의 거래에 관한 지침을 고시하였으며 에너지 프로슈머 전력 거래 개요도를 공



그림 1. 이웃 간 에너지 거래(출처: 산업통상자원부 보도자료)  
Fig. 1. Neighbor to Neighbor Energy Transactions

개하여 에너지 프로슈머가 생산 전력을 거래하는 예시로 이웃 간 거래, 전력 시장 판매, 전기요금 상계 세가지를 제안하였다. 특히, 그림 1과 같이 이웃 간 에너지 거래 모델과 그 실행 가능성을 제시하였다. 이 이웃 간 거래 모델에 대해 수원 솔대 마을 일대, 홍천 친환경 에너지 타운에서 전력 거래 실증 사업을 진행하였다. [3]의 연구에서는 스마트그리드 전력망 내의 모든 구성원에게 에너지 저장 장치(ESS)가 보급되어 있다는 가정하에, 각 구성원이 프로슈머로 참여할 수 있는 전력 시장 시스템을 고안하였으며 이 시스템의 전력 구매 과정 프로세스에 기반한 전력 실시간 거래 프로그램을 개발하였고 [4]의 연구에서는 네트워크 시뮬레이터를 통해 소비자 구매자 매칭 및 거래 이행 과정에 대한 복잡도와 실행 시간을 검증하여 프로슈머 매칭이 무선통신 환경에서 실시간으로 이루어질 수 있음을 설명하였다.

## 2.2 전력 수요 예측 관련 연구

전력 수요 예측은 안정적이고 효율적인 전력 계통 계획을 위해 필수적이다. 확실한 수요 예측은 전체 전력 계통의 안정성을 떨어뜨리며 전력 시장의 경제성에도 영향을 미친다.<sup>[5]</sup> 전력 수요 예측 기법은 크게 과거 데이터를 이용하여 현재를 추정하는 통계적인 방법과 입출력 사이의 관계 학습을 통해 추정하는 인공지능 방법으로 나눌 수 있다. 통계적 기반의 방법으로는 회귀 분석법, 시계열 분석에 기반한 예측 기법 등이 있으며, 인공지능형 기반의 기법으로는 NN(Neural Network)기법, 전문가 시스템, 퍼지 시스템 등이 있다. 이러한 기법들을 여러 가지 혼합하여 전력 수요 예측의 정확도를 향상하는 하이브리드 모델도 연구되고 있다.<sup>[6]</sup> 국내 연구 사례로 [7]에서 다국면 임계점 회귀모형을 평균 기온, 최대 및 최저 기온, 상대습도, 풍속 자료에도 적용하고 평균 기온의 이동 평균 및 이동 표준 편차를 활용하여 날씨변수에 대한

최대 전력 수요의 민감도를 분석하였다. 국내 전력 산업의 기존 수요 예측 기법으로는 한국 전력거래소의 단기 전력수요예측 프로그램(KSLF : KPX Short-Term Load Forecaster)이 있다. KSLF는 과거 전력 수요 패턴 분석을 통해 기온과 수요 특성을 고려하여 예측한다. 일반적으로 평일과 주말은 기온 요소를 반영한 지수 평활화법을 사용하며, 특수 일은 퍼지 회귀 분석을 이용한 수요 예측 기법을 사용한다. 이 수요 예측 기법에서는 시간 단위의 과거 전력수요, 일 단위의 최고 및 최저 기온, 특수일의 수요 예측을 위한 조사 조업률 등을 이용한다. 또한 국내에서 수요 예측을 포함한 다양한 전력 사업 분야에 인공지능을 접목하기 위한 시도를 하였으나, 데이터 확보 및 실증의 어려움으로 확대 적용 및 상용화에는 한계가 있었다. 그러나 지난 2020년 말 한전 전력연구원에서 ‘배전계통 부하 예측 및 관리시스템’이라는 전력 수요 예측 시스템 개발에 성공하여 기계학습과 빅데이터의 조합으로 개별 구성 간의 관계를 포괄적으로 학습하여 예측 정확도를 높이는 기법을 적용할 수 있게 되었으며 이후 이 시스템을 전국적으로 확대 적용하며 실증에 성공했다.

## III. Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 방식 경매의 전력 거래 시장 적용

### 3.1 VCG 경매의 정의 및 진실성 보장

기존의 중앙 집중형 공급이 아닌 개인(프로슈머) 간의 전력 거래가 가능해지며 이러한 소규모 전력시장에 대한 가격 책정 및 판매자, 구매자 매칭 기법이 요구되었다. 가격 책정 및 매칭 방안으로 경매 기반 매칭 방식이 주목받았다.<sup>[8]</sup> 경매는 다수가 제시하는 값에 따라 가격이 형성되는 판매방식이다. 판매할 가격을 미리 정하지 않고, 구매희망자(입찰자)들이 희망하는 가격을 입찰하면 그 중 최고가를 제시한 입찰자에게 낙찰하는 방식으로 진행된다. 일반적인 경매 방식은 원하는 물건에 대한 구매권 획득이 목적이기에, 입찰자는 곧 구매자가 된다. 이와 반대로 판매권을 얻기 위한 경매를 역경매라고 한다. 역경매에서는 구매자가 원하는 물건에 대해 더 낮은 가격에 입찰한 참여자가 낙찰받게 된다. 즉 구매자가 원하는 서비스, 물품 등을 더 낮은 가격에 제공해줄 수 있는 판매자가 낙찰되는 것이다.

이러한 경매 방식 중 Vickrey-Clarke-Groves (VCG)경매가 주목받고 있다. 이는 경매 참여자들 간 입찰 가격을 공유할 수 없는 봉인경매이며 지불 시 경

매의 우승자가 입찰한 가격이 아닌 두 번째로 높은 입찰액을 지불하는 차가 봉인경매 방식이다. 이 VCG 경매 방식은 진실성(Truthfulness)이 보장되는 특징이 있다. 이는 입찰자가 자신이 경매 대상에 대해 판단한 가치평가액에 대해 가감하지 않고 자신이 판단한 금액과 일치하는 입찰가를 제출하는 것이 약우월 전략으로 최소한 손해를 보지 않을 수 있는 전략인 것을 의미한다.<sup>[4]</sup> 이는 다음 예시를 통해 확인할 수 있다. 경매에 참여하는 입찰자  $i$ 가 있을 때, 이 입찰자의 사적 정보는 경매 대상에 대한 가치평가액이며  $v_i$ 로 표현하고  $b_i = B_i(v_i)$ 를 입찰 가격이라고 할 때 VCG 경매에서  $B_i(v_i) = v_i$ 로 입찰하는 것이 약우월전략임을 보이기 위해 다음 (가)-(마)의 다섯 가지 경우로 나누어 고려할 수 있다.

- (가).  $\max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} > b_i > v_i$  :  $b_i, v_i$  어떤 금액을 입찰하여도 참여자  $i$ 는 아무것도 얻지 못한다.
- (나).  $\max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} = b_i > v_i$  : 참여자  $i$ 는 최고 금액을 입찰한 참여자 중 하나이고  $i$ 가 최종 낙찰될 경우의 보수는  $v_i - b_i < 0$ 으로 음수이며 낙찰되지 못할 때의 보수는 0이다.  $v_i$ 를 입찰하였을 때에,  $i$ 는 낙찰되지 못할 것이므로 보수가 0이기에  $v_i$ 를 입찰하는 것이 유리하다.
- (다).  $b_i > \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} > v_i$  :  $b_i$ 를 입찰하면 확실하게 경매 대상을 얻고 그때의 보수는  $v_i - \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} < 0$ 이고  $v_i$ 를 입찰했다면 낙찰되지 못하므로 보수는 0이다. 따라서  $v_i$ 를 입찰하는 것이 유리하다.
- (라).  $b_i > \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} \geq v_i$  :  $b_i$ 를 입찰하면 확실하게 낙찰이 되고 그때의 보수는  $v_i - \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} = 0$  임.  $v_i$ 를 입찰하면 참여자  $i$ 는 최고 가격을 입찰한 사람 가운데 한 명으로 낙찰될 때와 낙찰되지 못했을 때의 보수 모두 0으로 같은 결과이다.
- (마).  $b_i > v_i > \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\}$  : 어떤 입찰 금액을 선택하여도  $i$ 의 입찰가격이 최고가이므로 확실하게 낙찰되고 보수는  $v_i - \max \{b_1, \dots, b_n\} / \{b_i\} > 0$ 으로 동일하다.

위 다섯 가지 예시를 통해 모든 경우에서 경매에서 자신이 경매 대상에 대해 평가한 가치평가액과 같은 금액을 조작 없이 입찰하는 것이 다른 전략과 비교하여 최소한 손해를 보지는 않는 전략이라는 것을 확인할 수 있다. 즉, 다른 입찰 참여자의 입찰 금액을 아는 것과 상관없이 자신이 생각한 가치대로 입찰하는 것

이 VCG 경매에서의 약우월전략이다. 경매를 통해 효율적으로 자원을 배분하기 위해서는 경매 대상에 대해 가장 높게 평가하는 입찰자 즉, 경매 대상에 대해 현재 필요도가 가장 높은 참여자에게 자원이 배분되어야 한다. 그러나 각 입찰자가 측정된 가치가 사적 정보이고 조작이 가능하다면 효율적 배분이 어렵다. 하지만 VCG 경매에서는 각 입찰자가 평가한 가치를 조작 없이 그대로 공개하게 하는 것이 유리한 전략임을 보장하는 특성이 있기에 입찰자의 사적 정보가 공개된 상태에서처럼 효율적인 배분이 이루어지게 할 수 있다. 따라서 VCG 경매 방식을 소규모 전력시장에 도입하게 될 시 중앙집중형 전력 공급 방식과 같은 일괄적 가격 책정이 아니더라도 판매자, 구매자가 자신이 판단한 가치에 따라 개인 간 전력을 거래 할 수 있게 해주고 시장 조작을 예방하는 효과가 있기에 궁극적인 목표인 프로슈머 간 거래 사업 증대에 기여할 수 있을 것이다.

### 3.2 소규모 전력거래 시장의 경매 프로세스

다음은 소규모 전력거래 시장의 VCG 기반 경매 프로세스를 설명한다. 그림 2와 같이 본 시스템에 존재하는 참여자이자 전력 거래 시장의 개체로는 프로슈머(Prosumer)와 일반소비자(Consumer), 중개시스템(Auctioneer)이 있다. 프로슈머는 전력의 생산 및 저장 현황에 따라 과잉되는 전력을 판매하는 판매자 역할, 부족한 전력을 구매하는 소비자 역할로 전략 선택이 가능하다. 일반 소비자는 전력 판매 능력은 없고 전력 수급을 희망하여 경매 단계에서 자신의 희망 수요량에 따라 판단한 가치평가액으로 입찰에 참여하는 경매 참가자를 의미한다. 중개시스템은 경매 참여자의 입찰(bidding)을 등록하고, VCG 메커니즘에 따른 경매 진행을 중개한다. 거래 과정은 경매 개시 단계, 낙

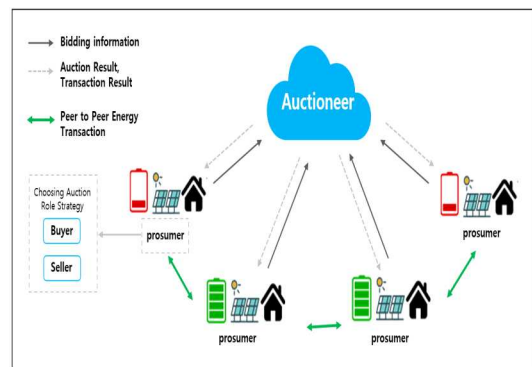


그림 2. 분산형 전력 거래 시나리오  
Fig. 2. Peer to Peer Energy Market Scenario

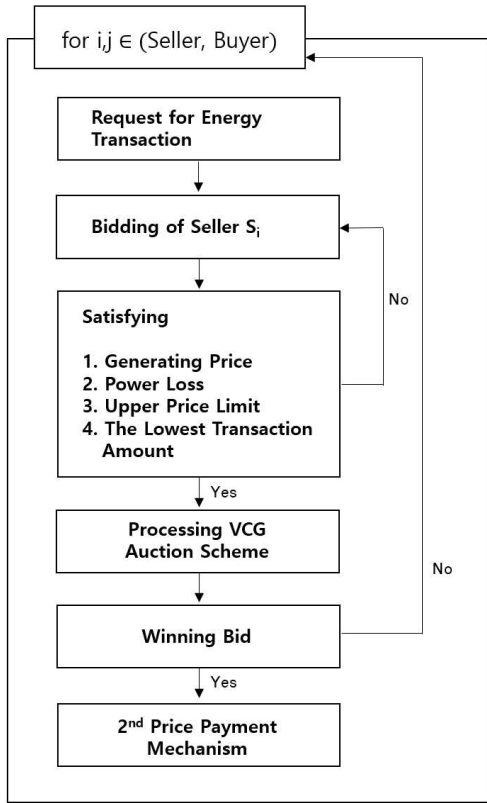


그림 3. 전력 거래 시의 VCG 경매 프로세스  
Fig. 3. VCG-Auction Process in Energy Transaction

찰가 및 지불 계산 단계, 결과 발표 및 공급 3단계로 진행된다. 그림 3은 전력 거래 시 VCG 경매 프로세스를 의미한다. 경매 개시 단계에서 소비자의 지리적 위치 및 필요 전력량과 같은 관련 구매 요청 정보가 중개시스템에 전송된다. 또한 판매 가능한 잔여 전력을 가진 프로슈머는 판매할 전력량을 중개시스템에 제출하며 자신이 공급해줄 수 있는 전력 입찰 가격을 책정, 판단하여 중개시스템에 알린다. 본 경매는 소비자의 구매 요청에 대한 판매권 획득이 목적이므로 역경매다.<sup>19),10)</sup> 중개시스템은 자원 정보 모집 및 관리 역할을 하며 이러한 구매 요청 정보 집합을 수집하여 경매를 진행한다. 경매가 시작되면 소비자와 프로슈머는 각각 Buyer 집합, Seller 집합에 속하게 되고, 전력 생산 가격, 전력 손실량, 최대 상한가, 최저 거래량 기준을 충족하는지 판단 후에 VCG 메커니즘 기반 전력거래 프로세스를 진행한다. 개인 간 거래에서의 전력 공급가는 중앙집중형 공급 방식의 기준 공급가를 초과할 수 없기에 최대 상한가가 존재하고 또한 전력 손실을 고려하여 최저 거래량 하한이 존재한다. 낙찰가 및

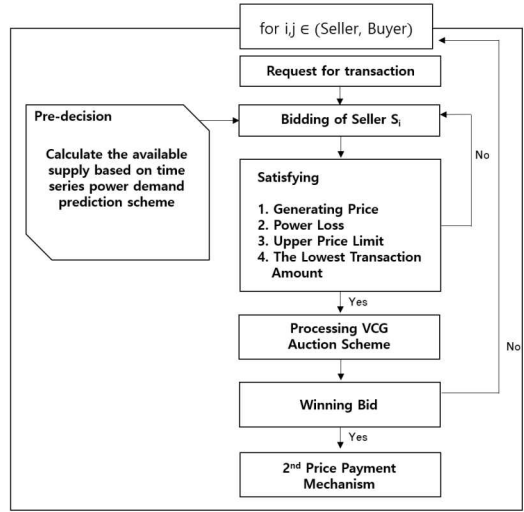


그림 4. 수요 예측을 적용한 전력 거래 시의 VCG 경매 프로세스  
Fig. 4. Demand Prediction based VCG Auction Process in Energy Transaction

지불 계산 단계에서 만약, i번째 소비자가 j번째 프로슈머의 입찰가격을 낙찰가(winning bid)로 채택하게 되면, VCG 경매의 지불액 산정 방식에 의해 이 낙찰자의 지불 금액은 본인의 입찰 금액이 아닌 후순위 입찰 금액으로 결정된다. 경매가 종료되면 중개시스템은 경매 결과를 발표하고 거래 이행을 허가한다. 본 논문에서는 이러한 VCG 경매의 과정에 개인 간 소규모 거래라는 특성을 반영하여 수요 예측을 고려한 VCG 경매 프로세스를 제안한다. 수요 예측을 고려한 VCG 경매 프로세스는 그림 4와 같다. 판매 가능한 잔여 전력을 가진 프로슈머는 중개시스템에 판매할 전력량과 입찰을 보고할 때 수요 예측 결과를 고려하여 제시한다. 중앙공급기관으로부터 필요한 양만큼 전력을 공급받아 사용하고 추후에 요금을 납부하는 기존 전력 공급 방식과 달리 소규모 에너지 거래에서는 프로슈머가 경매 프로세스를 위해 개인의 발전량 중 판매 가능량을 결정하여야 하며 구매자는 경매가 성사될 시에 이 거래량만큼만 금액을 지급 후 전력을 공급받는 특성이 있다. 따라서 프로슈머가 수요 예측에 기반하여 예상 소비량을 제외하고 판매가능량을 미리 결정하여야 하기에 개인 간 거래에서도 수요 예측 기법을 적용하는 것이 필요하다.

제안한 기법 기반의 개인 전력 거래의 예시 과정은 다음과 같다. 우선 개인 간 전력 거래를 위해 전력 시장에 참여하기 위한 계정 등록이 요구된다. 구성원이 계정등록을 요청하면 구성원의 계좌, 아이디, 거래를

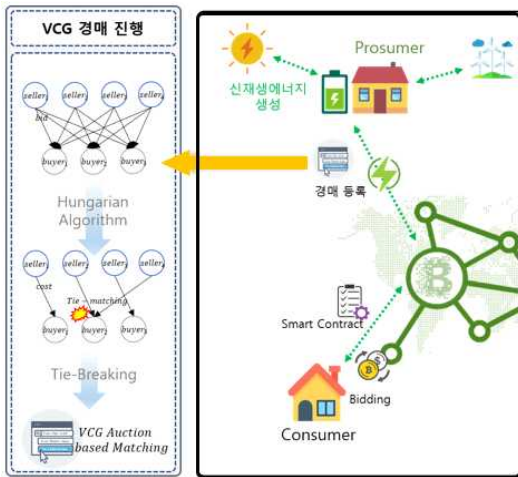


그림 5. VCG 기반 개인 전력 거래 과정 사례  
Fig. 5. An Example of VCG Auction based Peer-to-Peer Energy Transaction

위한 지리 정보 등을 중앙 서버에 등록하는 것이 선행되어야 한다. 이후 거래 과정에서는 제안한 역경매 프로세스에 따라 전력 수급을 희망하는 소비자가 등장할 시 경매가 진행 된다. 소비자의 구매 요청이 시스템에 공고되고 잉여전력이 존재하는 프로슈머는 개인의 수요 예측량을 시스템을 통해 확인하고 판매량과 판매 전력량당 가격을 설정하여 시스템에 판매 의사를 등록함으로써 경매에 참여한다. 이후 VCG 경매의 가격 결정 방식과 낙찰자 결정 방식에 따라 효용을 최대화할 수 있는 소비자와 판매자가 매칭되고 지불 금액이 결정된다.

본 절에서는 VCG 경매 방식의 소규모 전력 거래 시장 도입 가능성 및 제안하는 경매 프로세스에 대해 알아보았다. 중앙 집중형 공급 방식이 아닌 Peer 간에 이루어지는 거래에서 프로슈머는 개인의 발전량에서 예상 수요량을 제외한 판매할 수 있는 적절한 유휴 전력량에 대한 파악이 필요하며 중개시스템의 입장에서도 예상 전력 수급량을 고려한 거래 기준 확립 및 경매 중개가 필요하다. 다음 장에서는 이러한 수요 예측 기법의 하나로 ARIMA 모델을 이용한 시계열 데이터 기반 전력 수요 예측 기법과 실험 결과를 설명한다.

#### IV. ARIMA 기반 시계열 분석을 통한 전력 수요 예측

##### 4.1 ARIMA 모형

시계열 데이터(Time Series Data)란 시간의 흐름에 따라 순차적으로 관측한 값들의 집합이며, 예측 모델

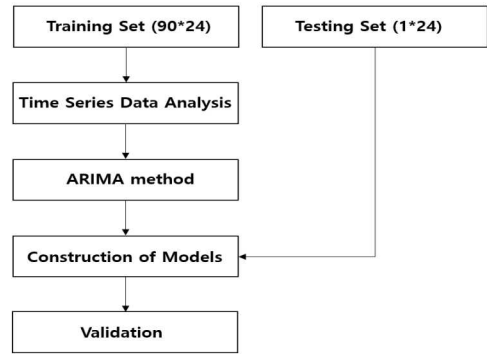


그림 6. ARIMA 모형 구축 프로세스  
Fig. 6. Process of ARIMA Method

에서 시간을 변수로 사용하는 특징이 있다. 따라서 시계열 데이터 분석은 과거 데이터의 패턴을 분석하여 미래의 값을 예측하는 방법으로, 과거의 데이터를 분석하여 얻은 패턴이 미래에도 지속될 것이라는 기본적인 가정으로 필요하다.<sup>[11]</sup> ARIMA(Autoregressive Integrated Moving Average) 모형은 시계열 데이터 분석 기법의 하나로 AR(Auto Regression) 모형과 MA(Moving Average) 모형을 합친 모형이다. AR모형은 예측하고자 하는 특정 변수의 과거 관측값의 선형결합으로 해당 변수의 미래값을 예측하는 기법이며 식 (1)로 표현된다.

$$y_t = c + \Phi_1 y_{t-1} + \Phi_2 y_{t-2} + \dots + \Phi_p y_{t-p} + \epsilon_t \quad (1)$$

(1)의 항에서  $t$  시점의 관측값이며  $c$ 는 상수,  $\Phi$ 는 가중치,  $\epsilon$ 는 오차를 의미한다. 따라서 식 (1)은  $(t-1)$  시점에서  $(t-p)$  시점까지의 관측값과 오차의 합으로 구성되어있다. MA(Moving Average) 모형은 예측 오차에 근거하여 미래를 예측하는 기법으로 식 (2)로 표현된다.

$$y_t = c + \theta_1 \epsilon_{t-1} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (2)$$

이는  $(t-1)$  시점에서  $(t-p)$  시점의 오차의 합을 의미한다.<sup>[12]</sup> ARMA 모형은 AR 모형과 MA 모형이 결합한 형태의 모형으로, 정상성(stationary)을 가지는 시계열 데이터에 적용할 수 있다, 따라서 비정상성(non-stationary) 시계열 데이터를 분석하는 경우에는 차분(differencing)을 통해 시계열 데이터가 정상성을 갖도록 변환한 ARIMA 모형이 사용된다. 따라서 이는 식 (3)으로 표현된다.

$$y'_t = c + \Phi_1 y'_{t-1} + \Phi_2 y'_{t-2} + \dots + \Phi_p y'_{t-p} + \theta_2 \epsilon_{t-2} + \dots + \theta_q \epsilon_{t-q} + \epsilon_t \quad (3)$$

이는 위에서 설명한 AR(Auto Regression)과 MA(Moving Average)를 더한 후에 차분이 추가된 형태이다.<sup>[13]</sup>

#### 4.2 제주 지역 전력 수요 예측

본 연구에서는 본 논문에서는 전력거래소(KPX)에서 제공하는 공공데이터인 제주 지역의 일별 시간단위 전력수요 데이터에 대해 ARIMA 모형을 활용해 2021년 11월까지의 데이터를 전처리 후 수요 패턴을 파악하고 90일 동안의 일자별 시간 단위 데이터를 기반으로 이후의 수요량을 예측하였다. 이후 Test Set에 대해 모델 적용 후에 R<sup>2</sup>(Coefficient of Determination), RMSE(Root Mean Square Error), MAPE(Mean Absolute Percentage Error) 값을 계산하여 모델의 성능을 평가하였다.

표 1. 모델의 평가기준 지표  
Table 1. Evaluation Metric and Formula

| Evaluation Metric                                | Formula   |
|--|---|
| R <sup>2</sup><br>(Coefficient of Determination) | $1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}$                   |
| RMSE<br>(Root Mean Square Error)                 | $\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$   |
| MAPE<br>(Mean Absolute Percentage Error)         | $\frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left  \frac{y_i - \hat{f}(x_i)}{y_i} \right  \quad (y_i \neq 0)$ |

### V. 실험

본 절에서는 전력거래소(KPX)에서 제공하는 ‘제주 지역 시간 단위 전력수요량’ 공공데이터를 이용하여 구축한 ARIMA 모형에 전력수요 예측 실험 결과를 제시한다. 실험의 과정은 그림 7과 같이 데이터 전처리, 계절성 분해, ACF 및 PACF 적용, 예측 및 결과 검증 순으로 진행된다. 진행에 앞서 DateTime형 데이터 전처리를 진행하여 [(년, 월, 일, 시), 전력수요량]으로 구성된 순차적 데이터를 생성한 후 그림 8에 제시된 결과와 같이 연도별 흐름에 따른 전력 수요량을 시각화하였다. 그림 9의 결과는 일별 전력 수요량과 이에 대하여 시계열 데이터의 Seasonality 기반

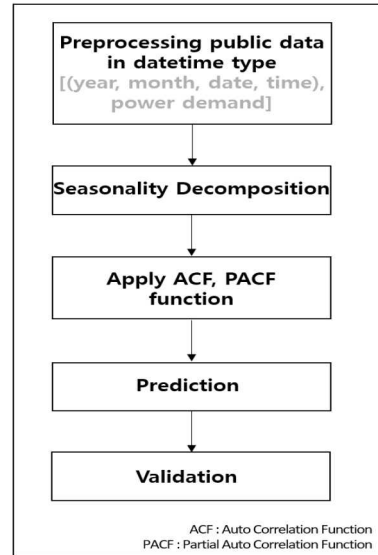


그림 7. ARIMA 모형 실험 프로세스  
Fig. 7. Process of ARIMA Model Simulation

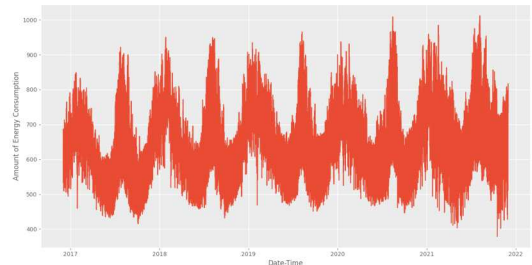


그림 8. 시간 흐름에 따른 전력 수요량  
Fig. 8. Energy Consumption Over Time

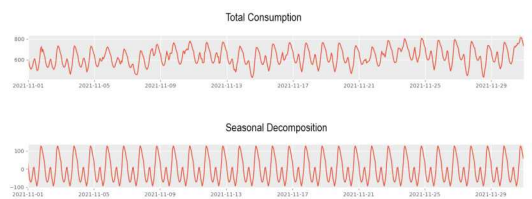


그림 9. 전체 수요량과 시계열 데이터의 계절성 분해  
Fig. 9. Total Consumption and Seasonal Decomposition

Decomposition을 진행한 결과이다. 그림 9의 결과를 통해 전력소비량은 소비자의 일과시간에 근거한 패턴이 반복됨을 파악하였다. 전력의 수요는 24시간 기준으로 반복되는 유사한 패턴이 있다는 것에 근거하여 이전 일자들의 수요 패턴이 있다는 것에 근거하여 이전 일자들의 수요 패턴을 통해 향후의 수요량을 예측할 수 있다고 판단하였다. 그림 10의 실험 결과는 ACF(Auto Correlation Function)과 PACF (Partial

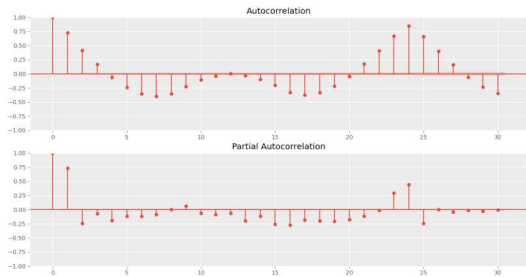


그림 10. ACF와 PACF 결과값  
Fig. 10. ACF and PACF of the Model

Auto Correlation Function)의 출력 결과이다. 전력 수요데이터의 경우 계절성이 있으며 정상성을 나타내지 않는 특성이 있지만 이를 1차 차분하게 되면 PACF가 0에 수렴하며 p-value가 정상성을 만족하는 데이터임을 확인하였고 이를 기반으로 분석 및 예측을 진행했다.

그림 11은 90일간의 전력 수요량을 기반으로 예측한 시간대별 예상 수요량이다. 우선, 그래프 시각화를 통해 Predict data가 실제 Original data와 유사한 형태로 수요 예측한 것을 확인하였다. 본 예측 결과를 평가 기준 지표에 따라 평가하였을 때, Original data와 Predicted data 사이의 Correlation Coefficient는 0.978의 상관관계를 가지며 18.299의 RMSE(Root Mean Square Error), 2.213의 MAPE(Mean Absolute Percentage Error)를 가진다. 국내 전력 산업의 기존 수요 예측 기법인 ‘기상-전력 민감지수를 반영한 지수평활법 적용 수요 예측 기법’에서는 기상 요소를 고려하고 시계열 자료를 사용하여 평균을 구할 때 최근의 데이터일수록 더 많은 가중치를 부여하고 과거의 데이터는 적은 가중치를 부여하여 미래를 예측한다.<sup>[4]</sup> 이 수요 예측 기법의 오차율은 1.18%이며 II절에서 설명한 ‘배전계통 부하예측 및 관리시스템’의 경우 국내 1만여 전력 선로를 대상으로 실증을 한

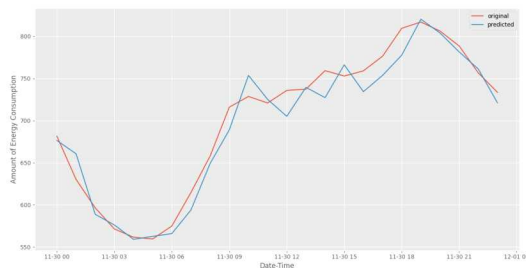


그림 11. 수요량의 실제값과 예측값 비교  
Fig. 11. The Comparison Between Real Value and Predicted Value

결과 현재 89% 수준의 정확도를 나타낸다.

실험 결과 및 기존 수요 예측 기법과 비교를 통해 본 연구에서 진행한 ARIMA 모델 적용 수요 예측 기법이 기상 요소 등 여러 외부 요인을 반영한 기법보다는 오차율이 높았으나 전력 수요 정보와 같이 계절성이 있으며 비슷한 사용 패턴이 반복되는 시계열 데이터에 대해 MAPE 2.21%로 효과가 있음을 검증하였다. 또한 본 실험에서 이용한 시간별 수요량 데이터와 함께 기상 데이터, 거래 상한가 데이터와 같은 외부 요인을 반영한 복합 데이터를 통해 예측한다면 오차율을 더욱 감소시킬 수 있을 것이다.

## VI. 결 론

신재생 에너지 생산력의 향상과 설비 보급 확대 및 ESS 기술의 발전과 함께 에너지 프로슈머의 개념이 등장하였다. 이는 국내의 전력 시장 내 공급 방식의 변화를 가져왔으며 Peer-to-Peer 간 전력 공급이라는 새로운 방식에 적합한 거래 기법의 도입이 요구되었다. 따라서 본 논문에서는 개인 간 전력 거래의 특수성을 고려하여 연구를 진행하였다. 기존 전력 공급 방식과 달리 개인 간 소규모 에너지 거래에서는 경매 참여 및 진행을 위해 구매량과 판매 가능량을 미리 결정해야 한다는 특성과 경매 입찰가 조작 등 시장 조작 가능성을 고려하여 시계열 데이터 기반 수요 예측과 진실성 보장이라는 장점이 있는 Vickrey-Clarke-Groves (VCG) 경매 프로세스에 대해 연구하였다. 또한 수요 예측에 근거한 전력 거래 프로세스를 제안하고 시계열 데이터 분석 기법 중 ARIMA 모형을 적용한 실험을 통해 예측 효과를 검증하였다. VCG 경매 방식의 진실성 보장이라는 특성과 수요 예측을 고려한 거래 기법은 안정적인 개인 간 전력 거래 시스템 확립과 신재생 에너지 거래 시장의 성장에 기여할 수 있을 것이다.

## References

- [1] S.-H. Park, W.-K. Park, T.-Y. Ku, T.-J. Jung, Y.-S. Ji, and I.-S. Lee, “Web/App service development trends for P2P electric power trading,” *Summer Annu. Conf. IEIE*, pp. 1881-1884, Jeju Island, Korea, Aug. 2020.
- [2] C. Park and Y. Kim, “A study on the possibility of P2P power transactions in Korea,” pp. 1-85, *Korea Energy Econ. Inst.*,



- Apr. 2016.
- [3] S. Moon, S. Park, J. Jeong, and Y. Choi, "Real-time power trading program considering energy storage system in smart grid environments," in *Proc. Symp. KICS*, pp. 798-799, Feb. 2020.
- [4] Y. Lee, S. Jeong, A. Masood, L. Park, N.-N. Dao, and S. Cho, "Trustful resource management for service allocation in fog-enabled intelligent transportation systems," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 147313-147322, Aug. 2020.
- [5] D.-J. Bae, K.-H. Chon, H.-G. Son, B.-S. Kwon, S.-H. Woo, C.-H. Moon, and K.-B. Song, "Error analysis of weekly load forecasting and improvement of load forecasting," *KIEE Summer Conf.*, pp. 752-753, Pyungchang, Korea, Jul. 2021.
- [6] J.-H. Lim, H.-W. Jung, K.-B. Song, J.-D. Park, K.-H. Chon, and H.-S. Park, "Short-Term load forecasting trend and forecasting method of overseas and Korea," *KIEE Summer Conf.*, pp. 494-495, Jeju Island, Korea, Jul. 2013.
- [7] D. Shin, "Analysis of the continuous and cumulative effect of temperature on power consumption volatility," *Korea Energy Econ. Inst.*, pp. 1-80, Sep. 2016.
- [8] K. Anoh, S. Maharjan, A. Ikpehai, Y. Zhang, and B. Adebisi, "Energy peer-to-peer trading in virtual microgrids in smart grids: A game-theoretic approach," in *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 11, no. 2, pp. 1264-1275, Mar. 2020.
- [9] M. Liwang, S. Dai, Z. Gao, Y. Tang, and H. Dai, "A truthful reverse-auction mechanism for computation offloading in cloud-enabled vehicular network," in *IEEE Internet of Things J.*, vol. 6, no. 3, pp. 4214-4227, Jun. 2019.
- [10] G. Baranwal and D. P. Vidyarthi, "A truthful and fair multi-attribute combinatorial reverse auction for resource procurement in cloud computing," in *IEEE Trans. Services Comput.*, vol. 12, no. 6, pp. 851-864, Nov.-Dec. 2019.
- [11] S.-G. Yoon, Y.-J. Choi, J.-K. Park, and S. Bahk, "Demand response design based on a Stackelberg game in smart grid," *2013 Int. Conf. ICT Convergence (ICTC)*, pp. 177-178, Jeju, Korea, Oct. 2013.
- [12] H. W. Kim and P. Lee, "Estimation of crematory facility demand in Suwon City using seasonal ARIMA model," *J. Health Informatics and Statistics*, vol. 42, no. 4, pp. 346-354, Nov. 2017.
- [13] K. Yunus, T. Thiringer, and P. Chen, "ARIMA-Based frequency-decomposed modeling of wind speed time series," in *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 31, no. 4, pp. 2546-2556, Jul. 2016.
- [14] H. S. Tak, T. Y. Kim, H. G. Cho, and H. J. Kim, "A new prediction model for power consumption with local weather information," *J. The Korea Contents Assoc.*, vol. 16, no. 11, pp. 488-498, Nov. 2016.

이 정 화 (Jeonghwa Lee)



2020년 2월 : 서울여자대학교 소프트웨어융합학과 학사 졸업  
 2020년 9월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선네트워크, 스마트그리드  
 [ORCID:0000-0002-0108-5419]

이 충 현 (Chunghyun Lee)



2018년 2월 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 학사 졸업  
 2018년 3월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학과 석사/박사과정  
 <관심분야> 스마트그리드, 게임이론, 무선 네트워크  
 [ORCID:0000-0002-0762-9771]

조 성 래 (Sungrae Cho)



1992년 2월 : 고려대학교 전자  
전산공학과 학사

1994년 2월 : 고려대학교 전자  
공학과 석사

2002년 12월 : 미국 조지아공대  
전기및컴퓨터공학과 박사

1994년 2월~1996년 8월 : 한국

전자통신연구원 연구원

2003년 1월~2003년 7월 : 미국 조지아서던대학교 컴  
퓨터공학과 조교수

2006년 9월~현재 : 중앙대학교 컴퓨터공학부 교수

<관심분야> 무선네트워크, Ubiquitous Computing

[ORCID:0000-0003-1879-688X]