

전력시장 적용을 위한 쿠르노 모델에서의 역수요함수 추정 방법 제안

論 文
54A-2-5

The Method for Estimating the Inverse Demand Curve of Cournot Model in Electricity Market

姜 東 周[†] · 許 眞^{*} · 金 泰 賢^{**} · 文 英 煥^{***} · 李 根 鈇[§] · 鄭 求 亨^{§§} · 金 發 鎬^{§§§}

(Dong-Joo Kang · Jin Hur · Tae-Hyun Kim · Young-Hwan Moon · Keun-Dae Lee · Koo-Hyung Chung · Balho H. Kim)

Abstract - At present Cournot model is one of the most commonly used theories to analyze the gaming situation in oligopoly market. But there exist several problems to apply this model to electricity market. The representative one is to obtain the inverse demand curve able to be induced from the relationship between market price and demand response. In Cournot model, each player offers their generation quantity to accomplish maximum profit, which is accomplished by reducing their quantity compared with available total capacity. As stated above, to obtain the probable Cournot equilibrium to reflect real market situation, we have to induce the correct demand function first of all. Usually the correlation between price and demand appears on the long-term basis through the statistical data analysis (for example, regression analysis) or by investigating consumer utility functions of several consumer groups classified as residential, industrial, and commercial. However, the elasticity has a tendency to change continuously according to the total market demand size or the level of market price. Therefore it should be updated as trading period passes by. In this paper we propose a method for inducing and updating this price elasticity of demand function for more realistic market equilibrium.

Key Words : Cournot Model, Equilibrium, Demand Curve, Generation Quantity, Market Price

1. 서 론

현재 전력시장에서 발생하는 게이밍을 반영하기 위한 수리적 모델로서 가장 보편적으로 사용되는 이론 중의 하나가 쿠르노 모델이다. 쿠르노 모델을 실제 전력시장에 적용할 때 가장 어려운 점 중의 하나는 정확한 해당 모델에 사용되는 수요와 시장가격 간의 관계를 정식화한 수요반응함수(혹은 역수요함수)를 구하는 것이다. 즉, 쿠르노 모델에서는 시장수요가 시장가격에 반응한다고 가정하고 그러한 상황에서 각 발전사업자가 자신들의 이익을 최대화할 수 있는 발전량을 산출한다는 것이다. 이러한 상황에서는 일반적인 완전경쟁시장의 경우보다 발전사업자가 발전량을 일정량 줄이게 되고 그로 인해 시장가격이 상승함으로써 자신들의 이익을 상승시키게 된다는 논리가 담겨 있다. 이것은 보통 대기업 위주로 구성되어 있는, 즉 공급자가 소수이고 소비자가 다수인 공급자 중심의 과점 시장에서 잘 들어맞는 모델이라고 할 수 있

다. 현재 우리나라의 경우도 6개 주요 발전사업자로 시장이 구성되어 있는 상황이기 때문에 쿠르노 모델을 이용한 전력시장 해석이 점점 활성화되고 있는 시점에 있다. 상기 언급한 바와 같이 이러한 쿠르노 모델이 정확한 균형점을 산출하기 위해서는 무엇보다도 정확한 수요함수가 도출되어야 한다. 기존 모델의 경우 장기간에 걸친 탐문조사나 데이터를 바탕으로 가격탄력성을 구하는 방식을 취하고 있다. 그러나 수요는 전기설비의 교체 소비자의 기호 등 여러 가지 변수로 지속적으로 변할 수 있기 때문에 이러한 고정적인 가격탄력성을 적용하는 것은 문제점이 될 수 있기 때문에 본 논문에서는 이러한 가격탄력성을 일정 거러주기 마다 갱신해줄 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

2. 본 론

게임이론은 경제학에서 모든 상호작용적인 의사결정과정에서 적용될 수 있는 유용한 모델이다[1][2]. 그러나 게임이론 역시 나름대로의 약점을 가지고 있다. 첫 번째로 게임이론은 게임의 전제조건과 규칙이 명확하게 규정되어야 하는데 종종 이러한 규칙들이 왜 필요하고 어디서부터 기인했는지를 고려하지 않고 너무나도 당연한 것으로 받아들이는 경향이 있다. 두 번째, 많은 게임에서 어느 하나를 명확하게 선택할 수 없는 다수의 균형을 가지게 되는 경우가 종종 있는데, 내쉬협상게임 이론에서의 에지워스 양자협상문제가 대표적인 예라고 할 수 있다. 세 번째 보수 의존성으로 인하여 많은 경우에서 비효율적인 결과를 가질 수 있다. 이것은 외부효과 중

† 교신저자, 正會員 : 韓國電氣研究院
E-mail : dj kang@keri.re.kr

* 正會員 : 韓國電氣研究院

** 正會員 : 韓國電氣研究院 · 先任研究員 · 工博

*** 正會員 : 韓國電氣研究院 · 責任研究員 · 工博

§ 正會員 : 에너지經濟研究院 · 研究委員 · 經濟學博士

§§ 正會員 : 弘益大學校 電氣情報制御工學科 · 博士過程

§§§ 正會員 : 弘益大學校 電氣情報制御工學科 · 助教授 · 工博

接受日字 : 2004年 6月 17日

最終完了 : 2004年 12月 29日

의 한 유형으로 볼 수 있다. 예를 들어 쿠르노 양자 모델에서 두 회사는, 독점모델에서 하나의 회사가 생산하는 물량의 절반 수준으로 생산량을 제한함으로써 이익을 증가시킬 수 있으며 이는 쿠르노 모델에서의 균형점이 된다. 그러한 이러한 용량철회에 의한 균형은 지속적으로 유지 가능한 균형점이 아니며 두 사업자는 시간이 흐름에 따라 상대방을 속이고 생산량을 증대시키게 되는 유인을 가지게 된다. 따라서 쿠르노 모델이 반드시 소수의 플레이어가 경쟁하는 과점 시장에 적합한 모델이라고도 단정할 수는 없지만 현재 가장 보편적으로 사용되고 있고 그러한 과정에서 비교적 오랜 시간 검증된 거친 모델인 것은 사실이다. 따라서 본 논문에서는 일단 이러한 쿠르노 모델을 이용해 전력시장을 분석한다고 가정했을 때 가장 관건이라고 할 수 있는 수요함수의 도출 및 적용 방법에 대해서 논의해 보고자 한다.

2.1 쿠르노 모델과 전력시장

전력이라는 재화는 일단 저장이 불가능하고 매 시간 수급 균형이 충족되어야 한다. 쿠르노 모델을 전력시장에 적용하는데는 몇 가지 문제점이 존재한다.

- (1) 쿠르노 게임은 정적인 상황을 분석한 것이며 게임 상에서 시간의 요소는 반영되지 않는다.
- (2) 쿠르노 게임은 전력망 각 노드별로 별도의 선형수요함수의 정의를 필요로 하는데 이는 실제 전력시장에서 볼 수 있는 매우 비탄력적인 수요함수를 보이는 현실에 반하는 것이다.
- (3) 쿠르노 게임은 시장 해석을 함에 있어서 많은 사항을 반영할 수 있지만 동시에 반영하지 못하는 것도 요소도 많다. 발전 및 송전 제약이라든지, 에너지계약발전설비나 군소 생산자 및 공급자들을 반영하는데 어려움이 있다.
- (4) 일반적으로 발전비용에 근거한 문제는 선형 함수(LP)로 모델링 되지만 쿠르노 모델은 2차 함수(QP)로 모델링 된다. 이는 대규모 시스템의 문제를 풀 경우 해를 구하는 방법이나 속도에 지장을 주게 된다.

(1)과 (2)의 사항은 적절한 수요모델이 유도되지 못할 경우 쿠르노 모델을 전력시장에 적용하기 어려울 수 있다는 것을 내포하고 있다. 실제 전력시장에서 단일 거래주기 동안의 전력수요함수는 거의 비탄력적이므로 수요곡선은 거의 수직에 가깝다. 대부분의 수요는 VoLL (Value of Lost Load)로 입찰에 응한다고 볼 수 있으며 극히 일부분의 차단가능부하(dispatchable load)만이 수반될 뿐이다.

2.1.1 패턴 생성

이러한 특징적인 전력수요 패턴은 그림 1의 수요곡선에서 보는 바와 같이 쿠르노 모델에서 요구하는 선형함수가 아니라 계단함수 형태로 표현된다. 그러나 보다 장기적인 시간에 걸친 수요는 이와 같은 단기적인 시간대에서의 비탄력적인 수직적인 형태와 달리 어느 정도 기울기를 가지고 그림 2에서와 같이 일정 수준의 탄력성을 가지는 수요곡선을 형성할 수 있다.

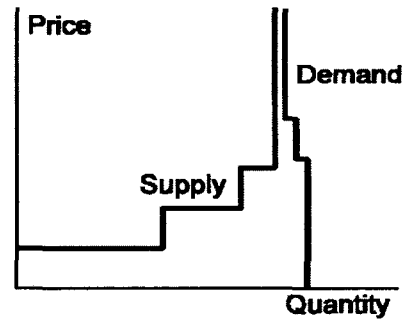


그림 1 전력시장의 수요곡선 형태
Fig. 1 Supply & Demand Curve Shape in Electricity Market

쿠르노 모델에서 사용하는 수요-가격의 관계를 나타내는 함수는, 기업이 생산량을 Q 만큼 생산했을 때, 생산될 재화를 모두 판매하기 위해 받을 수 있는 최고가격과의 관계를 알려주는 함수로서 일반적인 수요함수로서 봐도 무방하나 가격이 바뀌면 가격탄력성에 기인하여 생산자들이 생산량을 줄인다는 차원에서 역수요함수로 명명하기도 한다. 본 논문에서는 역수요함수나 수요곡선 혹은 수요함수는 동일한 곡선을 지칭하는 것임을 밝혀둔다. 그림 2는 이러한 역수요함수의 예를 보인 것이다.

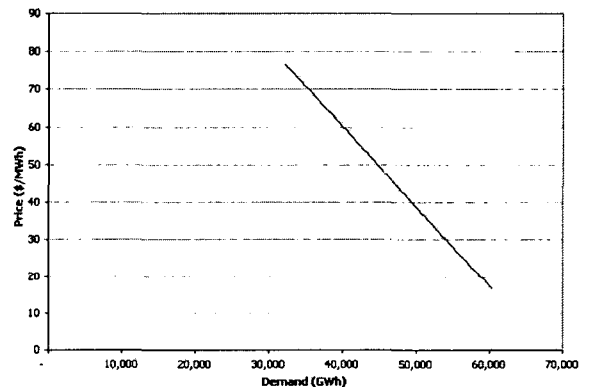


그림 2 역수요함수
Fig. 2 Inverse Demand Function

역수요함수는 기업이 생산계획을 Q로 결정했을 때, 생산된 재화를 모두 판다는 가정(균형분석) 하에 기업의 총수입(P×Q)가 얼마가 될 지에 관한 정보를 제공해 준다. 기업의 생산계획(즉 생산량) 결정은 기업의 총수입을 결정하므로, 기업은 생산계획에 대한 의사결정을 하기위해, 자기 제품에 대한 수요함수를 추정함으로써 역수요함수를 파악하며 결국 각 기업은 생산량에 따른 총수입을 예상할 수 있다.

2.2 전력시장의 역수요함수 추정

2.2.1 호주 NEM 시장 사례

호주에서의 전기가격탄력성이란 전기의 가격이 변할 때

그에 반응하여 전기수요량이 변화하는 양을 백분율로 표기한 것으로 정의된다. 가격탄력성은 단기적으로 정의되기도 하고 장기적으로 정의되기도 한다. 대다수의 실험적 연구에서 가격탄력성은 단기적으로나 장기적으로 비탄력적임이 보고되었다. 이는 전기가격이 1% 변할 때 전기수요는 1% 미만으로 변한다는 것을 의미한다.

1999년 NIEIR은 전기수요의 장기가격탄력성에 대한 연구를 수행하였다. NIEIR의 연구에 기초하여 호주 뿐만 아니라 해외 여러 기관에 의해 검토가 이루어졌고 부하 종류별로 다음과 같은 결과가 도출되었다[3][4].

주거용 부하	-0.25
상업용 부하	-0.35
산업용 부하	-0.38

호주의 장기가격탄력성은 주별로도 다른 결과를 보였는데 그러한 원인으로서는 다음과 같은 요인들이 있을 수 있다.

- 서로 다른 에너지 소비량을 가지는 기기나 설비들 사이의 이용비율이 다를 수 있음
- 대체 연료의 사용이 가능한지 여부와 해당 대체연료의 가격수준 정도가 다를 수 있음
- 최종 수용가의 전기수요에 대한 구조적 차이가 존재할 수 있음

주별로 추정된 전기수요의 장기가격탄력성은 다음과 같은 결과를 보였다.

New South Wales	-0.37
Victoria	-0.38
Queensland	-0.29
South Australia	-0.32
NEM	-0.35

상기 탄력성은 1980년에서 1995년에 걸친 기간에 대한 추정된 수치이며 그 당시 호주의 전기가격은 전반적으로 상승중에 있었다. 또한 가격변화에 대한 수요반응은 대칭적인 형태를 보이지는 않았는데, 즉 가격이 상승할 때와 하락할 때 동일한 비율의 수요변화를 보이지는 않았다는 것이다. 호주 NEM 시장의 수요탄력성은 전반적으로 -0.2에서 -0.5 사이의 값을 보였으며 이로 미루어 -0.35를 평균적인 값으로 선택할 수 있다. 그러나 이 값 역시 고려 기간의 길이에 따라 얼마든지 조정될 수 있다. 전기수요의 가격탄력성은 전기가격의 변동폭에 따라서도 달라질 수 있다. 예를 들어 수요의 가격탄력성은 다음과 같은 조건에서 상승하게 된다.

- 중간규모 소비자 10-20% 이상이 가격상승의 영향을 받을 때
- 대규모 소비자 5-10% 이상이 가격상승의 영향을 받을 때
- 소규모 소비자 20-30% 이상이 가격상승의 영향을 받을 때

이러한 가격탄력성은 가격변화의 수준에 따라 30~40%까지 상승할 수도 있다. 예를 들어, 주거용 부하의 가격탄력성이 -0.25일 때 가격이 30 내지 40%까지 상승하면 가격탄력성 역시 -0.4까지 상승할 수 있다는 것이다.

2.2.2 국내외 연구

일반적으로 쿠르노 모델에서의 역수요 함수는 그림 2에서 보는 바와 같이 $P = C - aQ$ 와 같은 형태의 선형함수로 정의된다. 여기서의 문제는 바로 절편 C 와 가격탄력성 a 를 구하는 것이다. 일단 선형함수를 가정하는 과정으로 인한 부정확성은 차치하더라도 이러한 선형화를 위한 기울기와 절편을 구하는 것 역시 간단한 문제가 아니다. 그림 3은 우리나라 CBP 시장 데이터를 근거로 하여 회귀분석을 통해 수요함수를 도출한 것이다. 우리가 필요로 하는 우하향곡선 대신 우상향하는 수요곡선이 형성된다. 이는 시장가격이 소비자의 구매 패턴에 영향을 미치지 못하는 것을 보여주고 있는 것이며 실제로 우리나라의 최종수요가는 모든 제반비용을 발전량으로 나눈 평균요금 개념을 적용하고 있다.

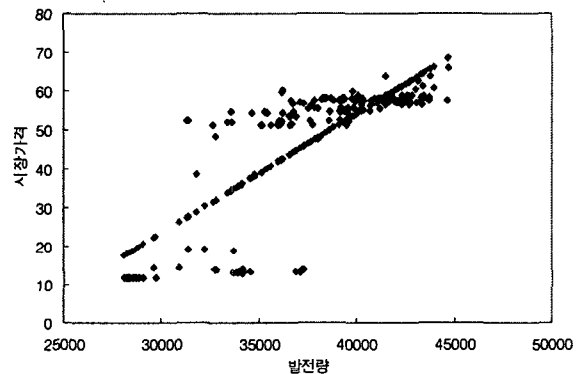


그림 3 발전단 수요와 시장가격 간의 상관관계
Fig. 3 Correlation between Demand and Price

수요입찰이 존재하는 시장에서는 과거의 역사적 데이터를 바탕으로 이러한 수요함수를 추정하는 것이 어느 정도 가능하지만 우리나라의 경우에는 이러한 수요측 입찰이 존재하지 않기 때문에 이러한 방법으로 수요를 추정하기는 힘들다. 또한 전력통계를 바탕으로 이러한 역수요함수를 추정하는 것 역시 불가능하다. 우리나라의 요금제도는 산업부하와 가정용 부하에 대한 요금이 이원화 되어있고 평균요금을 적용하기 때문에 이러한 통계 데이터를 바탕으로 수요함수를 구하면 생산량이 늘어날수록 시장가격이 상승하는 정비례관계의 함수가 도출된다. 즉, 이는 소비자가 도매전력가격에 반응하지 않으며 그로 인해 가격탄력성이 거의 존재하지 않음을 의미한다. 김남일은 다음과 같은 방법으로 역수요함수를 도출하였다. 가격탄력성은 이미 안다고 가정했을 때 특정 시점의 수요량과 시장가격을 입력하여 P 절편을 구해냈다[5]. 해당 문헌에서는 그림 4에서 보는 바와 같이 2000년도의 평균 전기요금인 74.56원/kW와 그에 해당하는 수요 32,509MW를 대입하여 쿠르노 모델을 위한 역수요함수를 도출하였다.

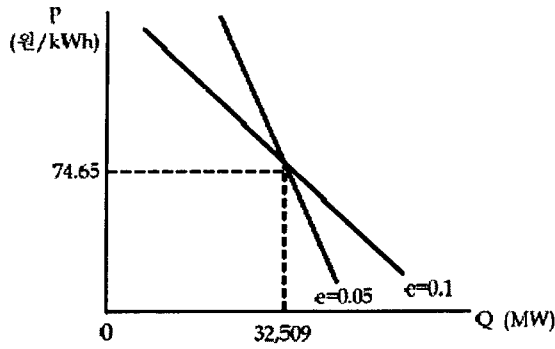


그림 4 가격탄력성과 균형점에 의한 수요곡선 도출
Fig. 4 Demand Curve formation from Market Equilibrium and Price Elasticity

2.2.3 역수요함수 추정을 위한 고찰

가장 바람직한 방법은 그림 3과 같이 실제적으로 누적된 데이터로 회귀분석 등의 방법을 통해 시장가격과 전력물량간의 관계를 구하는 것이다. 그러나 현재의 CBP 시장에서는 전력수요가 가격에 반응을 보이지 않기 때문에 쿠르노 모델에서 요구하는 우하향하는 함수가 아닌 물량과 가격이 정비례하는 형태가 도출된다. 이것은 이미 기본적인 수요곡선으로서의 조건을 충족시키지 못하는 것이며, 현재의 전기요금 구조가 규제 상태에서 소비자의 가격탄력성을 반영하고 있지 못하기 때문이다.

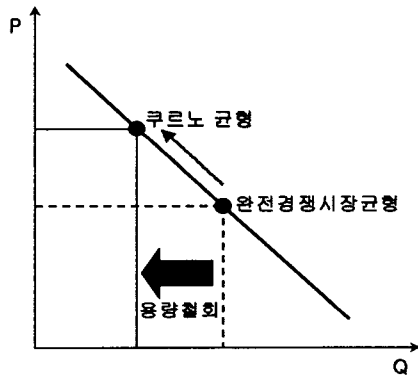


그림 5 쿠르노 균형과 완전경쟁균형
Fig. 5 Cournot Equilibrium & Perfect Competition Equilibrium

2.2.2에서 역수요함수의 P절편을 구하기 위해 사용되었던 (P,Q)=(74.65,32,509)는 CBP나 TWBP 시장에서는 완전경쟁 시장에서의 균형점으로 대체될 수 있을 것으로 사료된다. 쿠르노 모델이라는 것이 완전경쟁균형점에서의 발전량 Q^* 에서 일부 발전량을 철회함으로써 시장가격을 높이는 개념인 만큼 완전경쟁 수준에 해당하는 수요 역시 쿠르노 모델 역수요함수의 선상에 있을 것이기 때문이다. 완전경쟁시장균형은 공급자간 경쟁이 치열한 상태로서 발전사업자들이 자신의 한계비용 수준으로 입찰에 응하게 되는 경우를 말한다. 급전순

위에 포함되기 위한 경쟁이 치열하기 때문에 발전사업자들은 물리적 혹은 경제적 용량철회(economic withholding)¹⁾ 등에 의한 게이밍을 할 여유를 갖지 못한다. 현재 CBP 시장에서의 원가기반 입찰과 유사하다고 볼 수 있겠다. 따라서 결과적으로 쿠르노 모델은 모든 거래주기에 대하여 완전경쟁균형보다 일반적으로 높은 가격을 형성하게 된다.

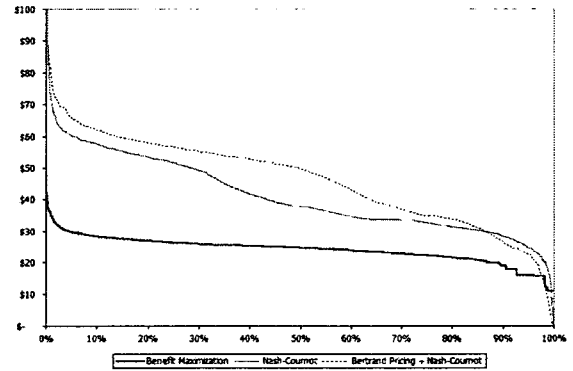


그림 6 시장균형모델 별 가격지속곡선 비교
Fig. 6 Price Duration Curves dependent on Market Equilibrium Models

그림 6은 실제 전력시장에서 이러한 완전경쟁균형과 쿠르노 균형²⁾의 구체적 시뮬레이션 결과를 보인 것으로 두 모델간의 균형 가격을 비교한 것이다. 호주 시장 데이터에 근거하여 년 중 가격지속곡선(Price Duration Curve)을 모의한 것으로 시뮬레이터는 Drayton Analytics사의 PLEXOS를 이용한 것이고, 그림 6을 통해 쿠르노 모델에 의한 가격지속곡선이 항상 완전경쟁균형에 의한 가격지속곡선보다 상위에 위치함을 알 수 있다. 완전경쟁균형은 PLEXOS에서 "Benefit Maximization"이라는 옵션으로 선택되는데 이는 완전경쟁일 경우 입찰곡선이 거의 한계비용곡선에 근접하게 되고 이에 의해 급전순위는 한계비용이 낮은 순으로 결정되며 이에 근거하여 각 사업자들이 자신의 이익을 극대화하는 발전량을 선택한다는 논리에서 파생된 명칭이다[6][7].

- 1) 용량철회(capacity withholding) : 자신이 보유하고 있는 발전기 용량이 가용하고 급전 순위에 들어갈 확률이 매우 높음에도 불구하고 시장가격을 조작하기 위한 목적으로 고의로 입찰에 참여하지 않는 행위. 이 경우 단순히 공급물량을 줄이는 행위를 물리적 용량철회(physical withholding)라고 하며 공급물량은 그대로 두고 입찰가격을 올리는 행위를 경제적 용량철회(economic withholding)라고 한다.
- 2) 완전경쟁균형이란 해당 전력시장에서 발전사업자 간 경쟁이 매우 치열한 상황에서 급전순위에 포함되기 위해 노력하는 발전사업자들에 의해 시장 전체의 공급비용 곡선 혹은 입찰곡선이 거의 비용함수에 근접하는 상황에서의 균형점을 의미한다. 반면 쿠르노 균형이란 시장에서 소수의 지배적 사업자가 존재하는 과점 모델을 가정한 것으로 각 발전사업자는 시장가격에 영향을 미칠 수 있는 영향을 가지고 있고 그로 인해 물리적 용량철회나 경제적 용량 철회들을 통해 공급량을 감소시킴으로써 시장가격을 상승시킬 수 있는 유인을 가지게 된다. 결과적으로 쿠르노 모델을 적용한 시뮬레이션의 결과는 완전경쟁 모델을 가정한 경우보다 높은 수준의 시장가격을 도출하게 되는 것이다.

PLEXOS는 호주, 뉴질랜드, 캘리포니아, 유럽 등 여러 지역에서 활용되고 있는 상용 시뮬레이터로서 시장균형을 구함에 있어서 총 3가지 모델을 도입하고 있는데, 그 중의 하나가 쿠르노 모델이다. PLEXOS에서는 쿠르노 모델의 수요함수에 대한 가격탄력성과 가격(P)절편을 별도의 산출 알고리즘 없이 사용자가 직접 구체적인 수치로 입력해 주어야 한다. 따라서 이를 통해 일반적인 상용 시뮬레이터에서도 쿠르노 모델의 수요함수를 정의해 주는 방법이 아직 미비하다는 것을 알 수 있다. 그림 7은 호주 전력회사들의 완전경쟁균형과 쿠르노 균형에서의 발전량을 비교한 것으로 쿠르노 모델에서 발전량이 상대적으로 적음을 알 수 있다.

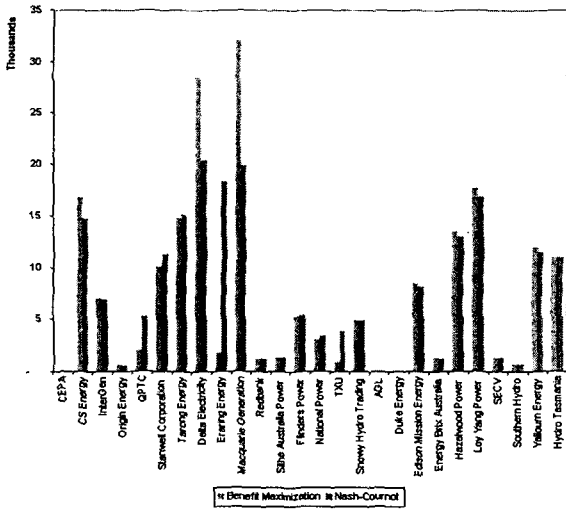


그림 7 완전경쟁균형과 쿠르노 균형에서의 발전량 비교

Fig. 7 Comparison of Equilibriums in Perfect Competition Model & Cournot Model

그렇다면 문제는 역수요함수의 기울기인 가격탄력성을 구하는 것이라 할 수 있는데, 수요측 입찰이 존재하는 시장의 경우 2.3.1의 호주의 사례와 같이 장기간에 걸친 수요입찰 데이터를 분석함으로써 구할 수 있다. 그러나 우리나라와 같이 수요측 입찰이 존재하지 않고 요금의 규제가 심한 경우에는 대규모 수용가나 부하집단을 중심으로 전력구매에 대한 수요를 일일이 탐문 조사할 수 밖에 없다. 그러나 이러한 작업은 너무나도 방대한 작업이기 때문에 우리나라 전체를 샘플링할 수 밖에 없다. 그러나 이러한 샘플링이 과연 우리나라 전체 시장을 반영할 수 있을 것인가와 과연 그러한 탐문 조사 방식이 실제 시장에서 발생하는 수요반응과 일치할 수 있을 것인가는 별개의 문제이다. 그리고 그러한 탐문조사가 장시간에 걸쳐 이루어졌다 할지라도 소비자의 기호는 시간에 따라 지속적으로 변하는 것이며 실제 전기를 소모하는 기기나 설비 역시 주기적으로 교체된다. 따라서 특정 시점에서 수요함수를 도출해낸다 하더라도 그것이 그 이후의 시점에도 유효한 수요곡선일지는 장담할 수 없다. 또한 쿠르노 모델은 엄격한 관점에서 볼 때 매 거래기간 별로 서로 다른 수요함수를 필요로 한다. 공급함수가 같은 경우 수요함수가 같다는 것은 같은 균형점을 도출해 내기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 인식하고 매 거래기간 별로 역수요

함수를 도출하는 구조적 방법을 제안하고자 한다. 더군다나 기존의 쿠르노 모델에서는 통상적으로 장기간의 관측에 걸친 역수요함수를 도출하여 그러한 수요함수를 다수의 거래기간에 동일하게 적용해왔다. 역수요함수가 장기간에 걸친 데이터에 의존하여 도출되었기 때문에 적용 역시 동일한 방식으로 밖에 이루어질 수 없다. 본 논문에서는 t기의 역수요함수를 t-1기의 완전경쟁균형점과 실제 균형점을 이용하여 구한다. t-1기의 정보를 t기의 역수요함수 생성에 이용하는 이유는 t기에 가장 가까운 시간으로서 전기소비자의 반응행태를 가장 잘 반영하고 있을 것으로 판단했기 때문이다. 그림 5에서와 같이 완전경쟁균형점과 쿠르노 균형점은 소비자의 수요함수 동일선 상에 존재하게 되고 두 점을 이은 점이 역수요함수의 기울기가 된다. 하지만 최신 수요의 탄력성은 반드시 이 두점을 지나는 선상에 있으라는 보장이 없기 때문에 t-1기에 실측된 실제균형점으로 이러한 가격탄력성을 계속해서 보정해 주게 되는 것이다. 기울기가 구해지면 이 수요곡선의 P절편을 구하기 위해서 t기에 대해 예측된 수요량과 가격을 대입하게 된다. 이는 t-1기에 대한 t기로의 데이터 갱신 역할을 하게 된다. t기의 수요량은 부하예측에 의해서 이미 구해져 있는 값이고 예측가격은 예측된 수요와 발전사업자의 공급비용함수를 바탕으로 완전경쟁균형점인 시장가격을 모의한 것이다.

매 거래주기마다 새로운 수요곡선을 생성하는 메카니즘은 다음과 같다. 그림 6에서 보는 바와 같이 이전 거래주기의 쿠르노 균형과 완전경쟁균형을 이용하여 가격탄력성을 구한 다음 그것을 t기의 가격탄력성으로 적용하고 t기의 예측된 완전경쟁균형점을 대입하여 그림 5에서의 P절편을 도출하고 그렇게 구해진 기울기(가격탄력성)과 절편으로 형성된 선형함수가 해당 거래주기의 수요곡선이 되는 것이다. t기의 가격탄력성을 구함에 있어서는 바로 t-1기의 완전경쟁균형점과 실제균형점을 이용할 수도 있고 실제균형에 대한 정보를 얻지 못한 경우 t-1기의 수요를 그대로 쓸 수도 있다. 최신 실측 시장균형에 대한 정보가 부족할 경우 t-2기, t-3기, ... , t-n기 식으로 가장 근접한 실측 시장정보를 바탕으로 향후 시장의 가격탄력성에 대한 정보를 갱신할 수 있다.

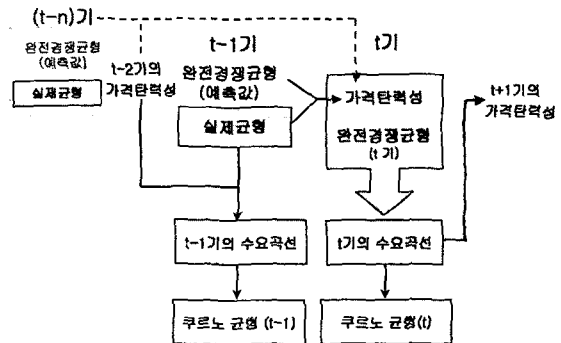


그림 8 거래주기별 가격탄력성 산출 알고리즘
Fig. 8 Algorithm for Estimating Price Elasticity on sequential trading periods

2.3 사례 연구

다음과 같은 간단한 전력시장을 가정해 본다. 시장에서는

두 개의 발전사업자가 존재하고 수요 측은 하나의 전력시장 혹은 단일 수용가로 가정한다. 송전계통은 고려하지 않으며 단순한 비제약급전계획의 논리로 완전경쟁균형과 쿠르노 균형 및 역수요함수를 구해보도록 한다. 본 예제 시장에서는 시장참여자가 둘 뿐이지만 제 3, 제 4의 시장참여자가 대기하고 있는 상태로 가정하여 과점 시장 뿐만 아니라 완전경쟁 시장의 설정이 가능하다고 가정한다.

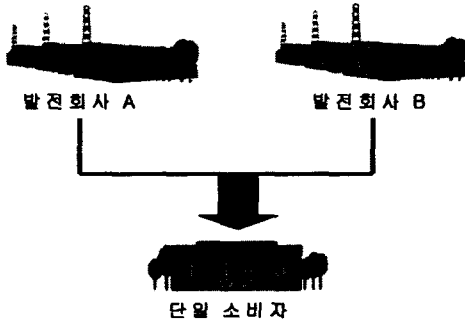


그림 9 사례연구를 위한 전력시장 구성
Fig. 9 Example Situation for Case Study

발전회사 A가 보유하고 있는 발전기의 용량은 500MW, 발전회사 B의 발전기 용량은 450MW이며, 각 발전기의 비용함수는 다음과 같다. 발전회사 A는 석탄화력 발전기를 보유하고 있고 발전회사 B는 LNG를 연료로 하는 가스터빈 발전기를 운영한다. 석탄의 연료단가는 6.192[원/Gcal]이며, LNG의 연료단가는 26.646[원/Gcal]이다. 또한 발전회사 A, B의 열소비효율 곡선은 각각 다음과 같다. 열소비효율의 단위는 [kcal/kWh]이다. 원래 CBP 시장에서 기저발전기와 첨두발전기는 각각 BLMP와 SMP로 별개의 이원화된 시장가격으로 보상받지만 본 예제에서는 편의를 위해 두 개 발전기가 하나의 SMP로 보상받는다 가정한다.

$$F_A(P_A) = 135.13 + 1.85P_A + 0.000369P_A^2 \quad (1)$$

$$F_B(P_B) = 24.85 + 0.53P_B + 0.001871P_B^2 \quad (2)$$

(1),(2)식에 연료 각 연료의 연료 단가를 곱하면 각 발전기의 비용함수가 도출된다(비용의 단위는 [원]).

$$C_A(P_A) = 836.72 + 11.46P_A + 0.002285P_A^2 \quad (3)$$

$$C_B(P_B) = 662.15 + 14.12P_B + 0.049855P_B^2 \quad (4)$$

(3),(4)식을 미분하면 두 발전기의 한계비용함수가 구해진다. 한계비용함수의 단위는 [원/kWh]이다.

$$p_A(P_A) = 11.46 + 0.004570P_A \quad (5)$$

$$p_B(P_B) = 14.12 + 0.099710P_B \quad (6)$$

(5),(6)의 한계비용에 따르면 A가 B보다 낮은 한계비용을 가지게 되므로(그림 8) 항상 급전의 우선순위를 가지게 된다. 일반적으로 기저 발전기와 첨두 발전기의 비용구조는 발전량이 소규모일 때는 첨두 발전기가 상대적으로 낮은 한계비용

을 가지지만 발전량이 많아질수록 첨두 발전기의 한계비용이 기저발전기의 한계비용을 초과하는 형태를 가지게 된다. 그러나 본 예제에서 아래와 같이 기저발전기가 일관적으로 낮은 비용함수를 띄게 된 것은 거래소의 실제 운영 데이터에서 임의의 두 발전기를 선택하는 과정에서 우연히 발생한 경우이다.

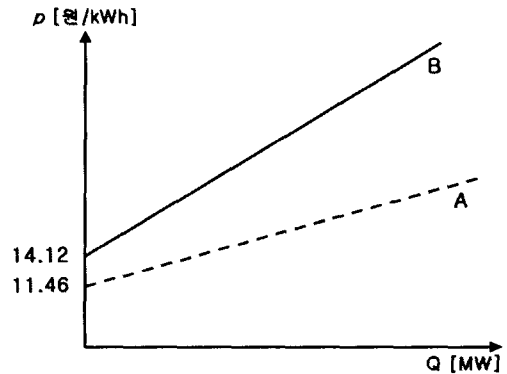


그림 10 두 발전기의 한계비용곡선
Fig. 10 Marginal Cost Curves of Two Generators for Case Study

향후 5시간의 수요예측 결과는 표 1과 같다.

표 1 예측 수요

Table 1 Forecasted Demand

	1h	2h	3h	4h	5h
수요	400	550	780	890	650

단위: [MW]

이러한 계통조건에서의 완전경쟁균형점을 각 거래주기별로 구하면 다음과 같다.

표 2 변동비 보상만을 가정했을 때

Table 2 Only Marginal Cost Recovery Assumed

시간	발전량[MW]	한계비용[원/kWh]	수익[원]
1h	(400,0)	(13.29, 0)	(5786, 0)
2h	(500,50)	(13.74, 19.11)	(7138,1939)
3h	(500,280)	(13.74, 42.04)	(7138,8972)
4h	(500,390)	(13.74, 53.01)	(7138,14199)
5h	(500,150)	(13.74, 29.08)	(7138,4349)
시간	시장가격	수익[원]	손익[원]
1h	13.29	(5316, 0)	(-470, 0)
2h	19.11	(9555, 956)	(2417, -983)
3h	42.04	(21020, 11771)	(13882, 2799)
4h	53.01	(26505, 20674)	(19367, 6475)
5h	29.08	(14540, 4362)	(7402, 13)

발전회사 A와 B의 순익함수는 다음과 같다. 현재 본 사례 연구에서는 기저발전기인 석탄화력과 첨두발전기인 LNG 복합 발전기의 실제 비용함수를 가져왔는데 시장가격이 충분히 높지 않은 경우 이러한 LNG 첨두발전기의 수익은 통상적으

로 (-)값이 나오게 된다. 따라서 그러한 (-) 보수를 보정하기 위해 용량요금(CP)을 보상해 주기로 한다. 만약에 (-) 보수가 나온다면 발전회사가 시장에 참여할 유인이 전혀 생기지 않기 때문에 논리적으로 큰 허점이 생기기 때문이다. 이러한 문제는 본 사례연구에서 기저발전기와 첨두발전기를 각각 1개씩 가진 발전회사를 가정하였기 때문에 발생하는 필연적인 약점이라 하겠다. 용량요금을 보상해 주는 방식도 계통의 예비력 마진에 따라, 실제 발전량과 비발전량에 따라 다양하고 세분화된 방식이 있을 수 있겠지만 여기서는 두 발전기의 모든 용량이 가용한 상태에서 입찰한다고 가정하고 단위 용량 요금에 가용용량을 곱해준 값을 보상해 주는 형태로 적용하기로 한다. 기저발전기인 A는 21.49[원/kWh], 첨두발전기인 B는 7.17[원/kWh]를 보상받는다고 한다. A 발전기의 용량요금은 21.49×500=10,745[천원]이고 B 발전기의 용량요금은 7.17×450=3,227[천원]이므로 이 금액을 상기 표 2의 수익과 순익에 각각 더해주면 된다.

$$PF_A(P_A) = p_A P_A - C_A(P_A) + CP_A \quad (7)$$

$$PF_B(P_B) = p_B P_B - C_B(P_B) + CP_B \quad (8)$$

표 3 변동비와 용량요금을 보상했을 때
Table 3 Marginal Cost and Capacity Payment Paid off

단위: 천원			
1h	(400,0)	(13.29, 0)	(5786, 0)
2h	(500,50)	(13.74, 19.11)	(7138,1939)
3h	(500,280)	(13.74, 42.04)	(7138,8972)
4h	(500,390)	(13.74, 53.01)	(7138,14199)
5h	(500,150)	(13.74, 29.08)	(7138,4349)
단위: 원			
1h	13.29	(16061, 3227)	(10275, 3227)
2h	19.11	(20300, 4183)	(13162, 5471)
3h	42.04	(31765, 14998)	(24627, 6026)
4h	53.01	(37250, 23901)	(30112, 9702)
5h	29.08	(25285, 7589)	(18147, 3240)

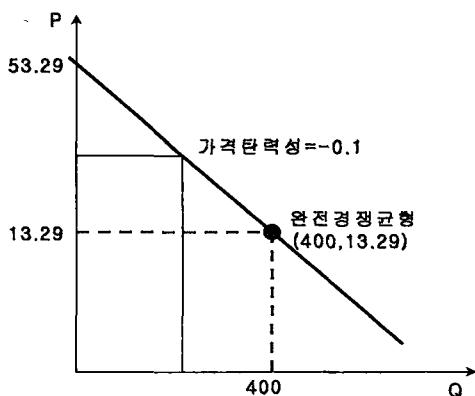


그림 11 역수요함수 구하기
Fig. 11 Inverse Demand Curve Estimated

그 다음 과정으로 그림 12와 같이 상기 5개의 거래 주기에 대해 쿠르노 균형을 구하게 된다. 쿠르노 균형의 경우는 완전경쟁균형과 달리 일률적으로 구해지지 않는 것이 아니라 한

거래주기 씩 완전경쟁균형과 쿠르노 균형이 구해지고 그 정보로부터 다음 기에 적용될 쿠르노 모델의 수요곡선에서의 가격탄력성이 결정되게 된다.

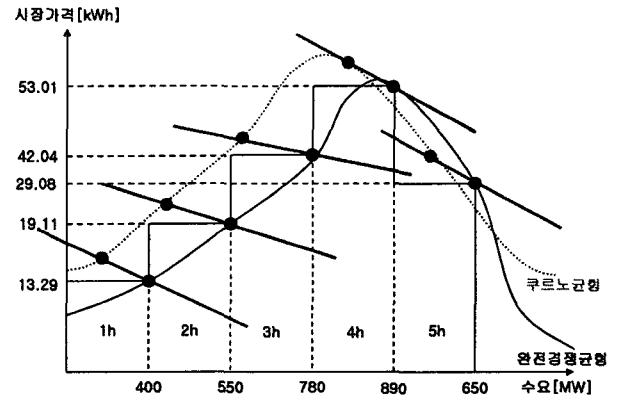


그림 12 지속적인 쿠르노 수요함수의 생성
Fig. 12 Cournot Demand Function Produced every trading period

그런데 여기서 문제가 되는 것은 제일 첫 번째 거래주기에 적용되는 쿠르노 모델의 역수요함수에 들어가는 가격탄력성이다. 이는 현실에서 실제적인 수요조사에 의해 조사된 수치를 적용하는 것이 가장 바람직하겠지만 본 사례연구에서는 단순히 -0.1이라고 가정한다. 이 값은 특정한 의미가 있는 것은 아니며 수요탄력성은 $-\infty < e < 0$ 사이에서 어떤 값으로든 존재할 수 있다. 이 경우 제1 거래주기에서 역수요함수는 다음과 같고 이를 통해 수요곡선의 P절편을 구할 수 있다. P절편은 53.29이고, 역수요함수는 $P = -0.1Q + 53.29$ 가 된다.

해당 역수요함수에 근거하여 다음과 같은 (9),(10),(11)의 연립방정식으로 쿠르노 모델이 정식화 될 수 있다. 여기서 P^* 는 쿠르노 모델에서의 균형점인 시장가격, $Q = P_A + P_B$ 는 시장에 공급된 발전량 혹은 수요량을 의미한다.

$$P^* = -0.1Q + 53.29 \quad (9)$$

$$\frac{dPF_A}{dP_A} = P^* - \frac{dC_A}{dP_A} = 0 \quad (10)$$

$$\frac{dPF_B}{dP_B} = P^* - \frac{dC_B}{dP_B} = 0 \quad (11)$$

(9)~(11)식을 연립하여 풀게 되면 첫 번째 거래주기에서의 쿠르노 균형인 $(Q^*, P^*) = (355, 17.80)$ 가 산출된다. 만일 실제 균형이 $(Q_{real}, P_{real}) = (375, 15.45)$ 이었다면, 1h의 완전경쟁균형점은 (400, 13.11)이므로 두 균형으로부터 차기 거래주기인 2h에 적용될 새로운 가격탄력성이 보정되어 산출된다. 여기서 α 는 가격탄력성, 아래첨자 2h는 해당 거래기간을 의미한다.

$$\alpha_{2h} = \frac{15.45 - 13.29}{375 - 400} = -0.0864$$

거래주기 2h의 쿠르노 균형은 또 다시 거래주기 1h의 과

정과 동일한 방식으로 구해지게 된다. 이러한 과정을 거치면서 과거의 누적된 데이터를 도출된 수요함수의 가격탄력성은 최신 데이터와 더불어 계속해서 갱신되게 된다.

현실적인 적용에 있어서는 이러한 업데이트 주기는 물리적 1시간을 의미하는 것이 아니라 단위 거래주기나 업데이트 주기를 의미하는 것이다. 업데이트 주기는 1시간이 될 수도 있고 그보다 짧은 거래주기가 될 수도 있으며 하루나 혹은 일주일일 될 수도 있을 것이다. 거래주기 별로 가격탄력성이 업데이트 되면서 다음과 같이 매 거래주기별 쿠르노 모델에 적용될 수요함수가 생성될 수 있다.

3. 결 론

일반적으로 쿠르노 모델에서의 가격탄력성은 수요입찰이 존재하는 경우 과거 오랜 시간동안의 데이터를 통해 구해지고, 그러한 수요입찰이 존재하지 않는 경우는 대규모 수용가를 중심으로 직접적인 탐문을 통하여 실제 소비자의 효용함수를 구하는 방법이 유일하다. 그러나 이러한 방식은 한번의 소비함수를 얻는데 매우 긴 시간과 많은 노력이 들어가는 관계로 지속적으로 갱신시켜 주는데 어려움이 있다. 또한 이러한 소비자 효용함수의 생성이 전체적으로 이루어지는 것이 아니라 대규모 수용가 혹은 부하 종류별로 이루어지는 관계로 실제로 정확성을 가지는 것인지에 대해서도 의문이다. 그리고 설사 모든 소비자를 대상으로 탐문을 통한 효용함수를 구했다 했을지라도 실제 실시간 현물시장에서 소비자들이 그러한 효용함수를 따르는 소비패턴을 보여줄 지도 의문이다. 따라서 본 논문에서는 실제적으로 실측된 데이터가 시장의 현황을 가장 정확하게 반영하고 있다고 보고 그러한 실측 데이터와 예측 시물레이션을 적절히 조합하여 지속적으로 갱신될 수 있는 가격탄력성과 그에 따른 쿠르노 균형을 산출하는 과정을 보였다. 이러한 방식으로 쿠르노 균형을 갱신하는 메카니즘은 여러 측면에서 또한 시장참여자들 개개에게 의미를 제공할 수 있다. 첫째 시장운영자 입장에서는 실측 균형을 완전경쟁균형과 쿠르노 균형과 비교해 봄으로써 현재의 시장에서 어느 수준의 경쟁이 이루어지고 있는가를 측정할 수 있고 발전사업자를 비롯한 소비자 측면에서도 그러한 정보를 바탕으로 자신의 입찰전략이나 거래전략을 수립할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 본 논문에서의 초점인 가격탄력성을 보다 정밀하고 구체적으로 산출할 수 있는 방법과 더불어 이러한 체제를 시장감시에 적용할 수 있는 방안에 대해 추가적인 연구를 수행할 생각이다. 또한 본론의 서두 부분에도 언급했듯이 쿠르노 모델은 그 범용성에도 불구하고 비현실적인 약점을 일부 가지고 있기 때문에 쿠르노 모델의 그러한 문제점과 대응 보완책에 대한 분석도 후속 연구를 통해 수행할 계획이다.

참 고 문 헌

[1] 김영세, "게임이론", 박영사, 1999
 [2] Avinash Dixit & Susan Skeath, "Games of Strategy", NORTON, 1999
 [3] Natalia Fabra, Nils-Henrik von der Fehr, David Harbord, "Designing Electricity Auctions", February 2004

[3] NECA, "Australia National Electricity Code"
 [4] National Institute of Economic and Industry Research, "The price of elasticity of demand for electricity in NEM Regions", NEMMCO(National Electricity Market Management Company, 2002
 [5] 김남일, "경쟁적 전력시장에서의 정부의 역할", 에너지경제연구원, 2001. 12.
 [6] Glenn Drayton, "PLEXOS for Power Systems", Drayton Analytics, 2004
 [7] 한국전기연구원, 양방향 전력시장에서의 시장지배력 행사 가능성 및 대응방안, 산업자원부, 2003.5.

저 자 소 개



강 동 주 (姜東周)

1975년 9월 9일생. 1995년 홍익대학교 전자전기 제어공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기정보 제어공학과 졸업(공학석사). 2001년~현재 한국전기연구원 전력시장 기술연구그룹 연구원. 관심분야 : 전력시장에서의 전력거래 분석 및 시장참여자의 전략적 행위 모델 구현
 Tel : 031-420-6138, Fax : 031-420-6139
 E-mail : dj kang@keri.re.kr



허 진 (許眞)

1973년 4월 27일생. 1997년 고려대학교 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 졸업(석사). 1999년 한국전기연구소 입사. 현재, 전기시험연구소 전력시장기술연구그룹 근무. 주요 관심분야: EMTDC 모델링 및 RTDS를 이용한 실시간 시물레이션, 전력시장에서의 Market simulation 분석 및 시물레이터 개발
 Tel : 031-420-6133, FAX : 031-420-6139
 E-mail : jin hur@keri.re.kr



김 태 현 (金泰賢)

1989년 한국과학기술원 과학기술대학 전기 및 전자공학과 졸업. 1994년 8월 University of Maryland 전기공학 석사. 1998년 5월 동 대학 전기공학 박사. 1998~1999년 1월 Institute for Systems Research에서 F.R.A.로 근무. 1999년~현재 한국전기연구원 선임연구원.
 Tel : 031-420-6132, Fax : 031-420-6139
 E-mail : thkim@keri.re.kr



문영환 (文英煥)

1979년 서울대학교 전기공학 학사. 1981년 동대학원 전기공학 석사. 1990년 University of Texas at Arlington 전기공학 박사. 1981년 전기연구원 입사. 선임연구원, 전력계통연구실장, 시스템제어그룹장 등을 거쳐 현재 전력시장기술연구그룹 그룹장.
Tel : 031-420-6130, Fax : 031-420-6139
E-mail : yhmoon@keri.re.kr



정구형 (鄭求亨)

1974년 9월 20일생. 2001년 홍익대학교 전기전자제어공학과 졸업. 2003년 동 대학원 전기정보제어공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 박사과정 재학 중.
Tel : 02-338-1621, Fax : 02-320-1110
E-mail : ga1110412@wow.hongik.ac.kr

이근대 (李根欽)

1987년 서울대학교 외교학과 졸업. 1995년 뉴욕주립대학교 (SUNY-Buffalo) 경제학 석사. 1998년 동 대학 경제학 박사. 1999년 12월~2004년 6월 한국전기연구원 선임연구원으로 재직. 2004년 7월~현재 에너지경제연구원 연구위원. 주요 관심분야로는 전기사업자의 입찰행위 및 불공정사례 분석, 대체에너지를 이용하는 발전사업 활성화 등
Tel : 031-420-2259
E-mail : kdlee@keei.re.kr



김발호 (金發鎬)

1962년 7월 12일생. 1984년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1984~1990년 한국전력공사 기술연구본부 전력경제연구실 근무. 1992년 University of Texas at Austin 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 졸업(공학박). 1999년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수
Tel : 02-320-1462, Fax : 02-320-1110
E-mail : bhkim@wow.hongik.ac.kr