

전력시장의 반복게임에 적용하기 위한 쿠르노 모델의 역수요함수 및 균형점 산출

강동주*, 이근대*, 허진*, 김태현*, 문영환*, 정구형**, 김발호*
한국전기연구원*, 홍익대학교**

The Method for Inducing Demand Curve of Cournot Model for forecasting the Equilibrium of Repeated Game in Electricity Market

Dong-Joo Kang, Kun-Dae Lee, Jin Hur, Tae-Hyun Kim, Young-Hwan Moon, Ku-Hyung Jung, Balho.H Kim
KERI, Hongik Univ.

Abstract - 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. 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 거래주기 마다 갱신해줄 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

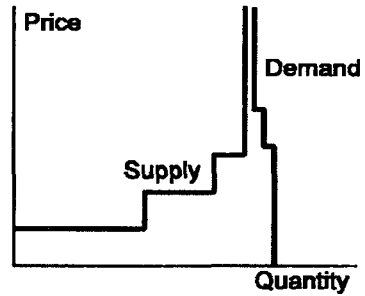


그림 1 전력시장의 수요곡선 형태

1. 서 론

게임이론은 경제학에서 모든 상호작용적인 의사결정과정에 적용될 수 있는 유용한 모델이다. 그러나 게임이론 역시 나름대로의 약점을 가지고 있다. 첫 번째로 게임이론은 게임의 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 중의 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. 또한 쿠르노 모델은 원래가 전력시장이 아닌 일반적인 재화 시장을 모델로 한 것이다. 전력시장은 일반적인 다른 재화와는 큰 차이점이 있고 이를 반영한 수정된 쿠르노 모델이 필요하다.

2. 본 론

2.1 쿠르노 모델과 전력시장

전력이라는 재화는 일단 저장이 불가능하고 매 시간 수급균형이 충족되어야 한다. 실제 전력시장에서 단일 거래주기 동안의 전력수요함수는 거의 비탄력적이므로 수요곡선은 거의 수직에 가깝다. 대부분의 수요는 VoLL(Value of Lost Load)로 일괄에 응한다고 볼 수 있으며 극히 일부분의 차당가능부하(dispatchable load)만이 수반될 뿐이다.

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.

2.2 쿠르노 모델의 역수요 함수

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 수요함수의 역함수이다. 그림 2는 이러한 역수요함수의 예이다.

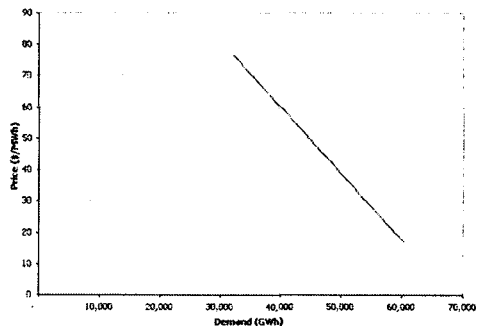


그림 2 역수요함수

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.

2.3 전력시장의 역수요함수 추정

일반적으로 쿠르노 모델에서의 역수요 함수는 그림 2에서 보는 바와 같이 $P = C - aQ$ 와 같은 형태의 선형 함수로 정의된다. 여기서의 문제는 바로 절편 C 와 가격 탄력성 a 를 구하는 것이다. 일단 선형함수를 가정하는 과정으로 인한 부정확성은 차치하더라도 이러한 선형화를 위한 기술기와 절편을 구하는 것 역시 간단한 문제가 아니다.

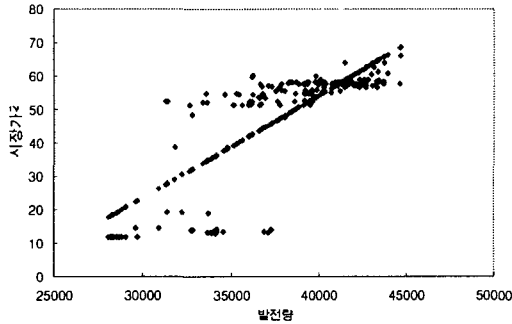


그림 3 발전단 수요와 시장가격 간의 상관관계

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 전력통제를 바탕으로 이러한 역수요함수를 추정하는 것 역시 불가능하다. 우리나라의 요금제도는 산업부하와 가정용부하에 대한 요금에 이원화되어있고 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. 해당 문헌에서는 2000년도의 평균 전기요금인 74.56원/kWh와 그에 해당하는 수요 32,509MW를 대입하여 쿠르노 모델을 위한 역수요함수를 도출하였다.

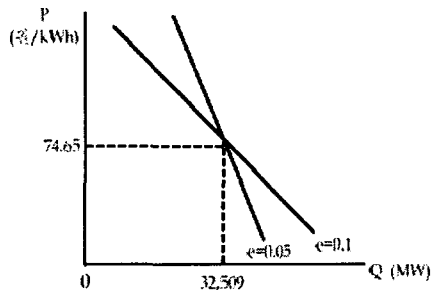


그림 4 가격탄력성과 P절편

물론 가격탄력성은 고정으로 두더라도 매 시점마다 시장 가격과 예상수요가 바뀌기 때문에 P절편이 달라지고 그

로 인해 역수요함수 역시 달라진다. 그로 인해 1년 365일 8760시간의 각 시간대별(혹은 거래기간)로 다른 역수요함수가 구해질 수 있다.

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.

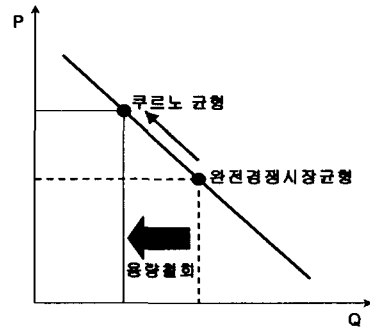


그림 5 완전경쟁균형과 쿠르노 균형

2.3.2에서 역수요함수의 P절편을 구하기 위해 사용되었던 $(P, Q) = (74.65, 32,509)$ 는 CBP나 TWBP 시장에서는 완전경쟁시장에서의 균형점으로 대체될 수 있을 것으로 사료된다. 쿠르노 모델이라는 것이 완전경쟁균형에서의 발전량 Q^* 에서 일부 발전량을 철회함으로써 시장가격을 높이는 개념인 만큼 완전경쟁 수준에 해당하는 수요 역시 쿠르노 모델 역수요함수의 선상에 있을 것이기 때문이다.

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 기술기(가격탄력성)와 절편으로 형성된 선형함수가 해당 거래주기의 수요곡선이 되는 것이다.

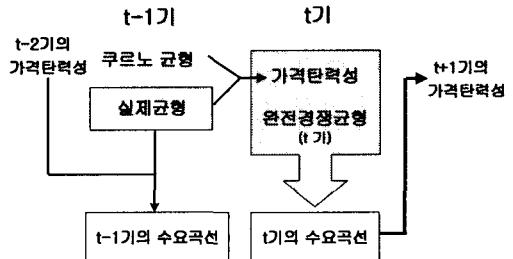


그림 6 가격탄력성 산출 알고리즘

2.4 사례연구

다음과 같은 간단한 전력시장을 가정해 본다. 시장에서

는 두 개의 발전사업자가 존재하고 수요 측은 하나의 전력시장 혹은 단일 수송가로 가정한다. 송전계통은 고려하지 않으며 단순한 비계약급전계획의 논리로 완전경쟁 균형과 쿠르노 균형 및 역수요함수를 구해보도록 한다.

발전회사 A의 용량은 500MW, 발전회사 B의 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 보상받았다고 가정한다.

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

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

향후 5시간의 수요예측 결과는 표 1과 같다.

표 1 예측 수요 단위: [MW]

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

이러한 계통조건에서의 완전경쟁균형점을 각 거래주기별(1시간 단위)로 구하면 다음과 같다.

표 2 거래주기별 시장균형점

	발전량[MW]	시장가격[원/kWh]
1h	(400,0)	13.29
2h	(500,50)	19.11
3h	(500,280)	42.04
4h	(500,390)	53.01
5h	(500,150)	29.08

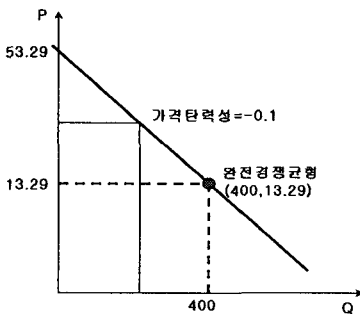


그림 7 P-절편 구하기

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 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 (1), (2), (3)의 연립방정식으로 쿠르노 모델이 정식화 될 수 있다.

여기서 P^* 는 쿠르노 모델에서의 균형점인 시장가격이고 $Q = P_A + P_B$ 로서 시장에 공급된 발전량을 의미한다.

$$P^* = -0.1Q + 53.29 \quad (1)$$

$$\frac{dPF_A}{dP_A} = P^* - \frac{dC_A}{dP_A} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{dPF_B}{dP_B} = P^* - \frac{dC_B}{dP_B} = 0 \quad (3)$$

(1)~(3)식을 연립하여 풀게 되면 첫 번째 거래주기에서의 쿠르노 균형인 $(Q^*, P^*) = (355, 17.80)$ 가 산출된다. 만일 실제 균형이 $(Q_{real}, P_{real}) = (375, 15.45)$ 였다면, 1h의 완전경쟁균형점은 (400, 13.11)이므로 두 균형으로부터 다음 거래주기인 2h에 적용될 새로운 가격탄력성이 보정되어 산출된다.

$$\epsilon_2 = \frac{15.45 - 13.29}{375 - 400} = -0.0864$$

2h의 쿠르노 균형은 또 다시 1h의 과정과 동일한 방식으로 구해지게 된다. 이러한 과정을 거치면서 과거의 누적된 데이터를 호출된 수요함수의 가격탄력성은 최신 데이터와 더불어 계속해서 갱신되게 된다. 현실적인 적용에 있어서는 이러한 갱신 주기로 꼭 1시간 단위로 할 필요는 없다고 생각한다. 그러한 갱신 주기는 1시간이 될 수도 있고 하루가 될 수도 있을 것이다.

3. 결 론

일반적으로 쿠르노 모델에서의 가격탄력성은 수요입찰이 존재하는 경우 과거 오랜 시간동안의 데이터를 통해 구해지고, 그러한 수요입찰이 존재하지 않는 경우는 대규모 수송가를 중심으로 직접적인 탐문을 통하여 실제 소비자의 효용함수를 구하는 방법이 일반적이다. 그러나 이러한 방식은 한번의 소비함수를 얻는데 매우 긴 시간과 많은 노력이 들어가는 관계로 지속적으로 갱신시켜주는데 어려움이 있다. 따라서 본 논문에서는 실제적으로 실측된 데이터가 시장의 현황을 가장 정확하게 반영하고 있다고 보고 그러한 실측 데이터와 예측 시뮬레이션을 적절히 조합하여 지속적으로 갱신될 수 있는 가격탄력성과 그에 따른 쿠르노 균형을 산출하는 과정을 보였다. 이러한 방식으로 쿠르노 균형을 갱신하는 메커니즘은 여러 측면에서 또한 시장참여자들 개개에게 의미를 제공할 수 있다. 첫째 시장운영자 입장에서 실측 균형을 완전경쟁균형과 쿠르노 균형과 비교해 봄으로써 현재의 시장에서 어느 수준의 경쟁이 이루어지고 있는가를 추정할 수 있고 발전사업자를 비롯한 소비자 측면에서도 그러한 정보를 바탕으로 자신의 입찰전략이나 거래전략을 수립할 수 있을 것이다. 향후 연구에서는 이러한 가격탄력성을 보다 정밀하고 구체적으로 산출할 수 있는 방법과 이러한 체계를 시장감시에 적용할 수 있는 방법에 대해 추가적인 연구를 수행할 생각이다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김영세, "게임이론", 박영사, 1999
- [2] NECA, "Australia National Electricity Code"
- [3] 김남일, "경쟁적 전력시장에서의 정부의 역할, 에너지경제연구원, 2001. 12.
- [4] Glenn Drayton, "PLEXOS for Power Systems", www.plexos.info
- [5] 한국전기연구원, 양방향 전력시장에서의 시장지배력 행사 가능성 및 대응방안, 산업자원부, 2003.5.