

수요관리사업자가 수요반응 전력시장에 미치는 영향 분석

Analysis on Demand Response Aggregator in Electricity Market

이 광 호*
(Kwang-Ho Lee)

Abstract - The purpose of Demand Response is to reduce the cost of excessive resources and equipment by spontaneous load reductions at peak loads. Having enough power consumers participating in these schemes is key to achieving the goal. Demand Response Aggregator (DRA) is responsible for recruiting demand resources and managing them to participate in reducing the load. DRAs change the price elasticity of demand functions by providing incentives to demand response, thereby affecting price formation in the electricity market. In this paper, this process is modeled to analyze the relationship between DRA's strategic bidding and market outcomes and load reductions. It analyzes the results by applying to competition between DRAs, competition between DR and Gencos, and coexistence of DR load and non-DR load. It is noteworthy that we have found a phenomenon called the Balloon Effect.

Key Words : Demand response, Electricity market, Demand reduction, Balloon effect, Demand response aggregator

1. 서 론

안정적 전력공급을 위해 충분한 발전 및 송전설비를 갖추어야 하는 것이 과거의 수급안정화 핵심대책이었다. 하지만 최근의 관심은 공급이 아닌 수요 측면에 모아지고 있다. 즉 전력수요가 피크에 이를 때 전력사용자에게 인센티브를 부여하여 자발적으로 부하감축을 하도록 유도함으로써 전력수요를 감소시키고자 하는 노력이 진행되고 있다. 이러한 부하감축을 수요반응자원(Demand Response: DR)이라 한다.

수요반응자원이 도입됨으로써 전력수요의 가격 탄력성은 증가하게 되고[1] 이로 인해 전력시장에서의 시장지배력 완화를 기대할 수가 있다. DR에 따른 장점들은 다양하게 제시되고 있으나 문제는 DR에 참여하는 부하가 충분히 확보되고 안정적으로 유지되는가이다. DR의 효과를 제고하기 위해 거래기초가격(NBTP) 조정, 감축량 산정을 위한 고객기준부하(CBL) 평가 등의 제도적 지원에 대한 고민이 이뤄지고 있다. 또한 감축의 신속성과 계측기술, 모니터링 시스템 등의 수준을 향상시키기 위한 첨단 ICT 기술 개발과 해결해야 할 과제이다.[2,3] 여러 가지 과제들이 있지만 본 연구에서는 수요관리사업자(Demand Response Aggregator: DRA)의 역할이 전력시장에 미치는 영향에 주목한다. 미래의 전력시장에서 피크부하의 변화에 중요한 역할을 하는 것이 수요관리사업자이다.[4]

국내에서 DRA는 전력거래소와 수요자원에 대한 등록, 신뢰성

검증 등의 업무를 하고 거래소로부터 모니터링 및 수요감축지시를 받는다. 한편 전력사용자에게는 전력시장 참여를 유도하는 각종 활동과 참여 계약 체결, 모니터링 및 에너지 관리시스템 설치, 수요감축 지시 등의 업무를 한다.[5] 전력시장에서 DRA의 역할에 주목하는 연구로는 Nekouei[4]의 논문을 들 수 있다. 시장운영자와 전력수요자의 사이에서 부하감축에 관련된 중간 조정역할을 하며 발전력을 공급하는 발전회사와의 관계를 선도-추종자 모형(Stachelberg Model)으로 설정하여 DRA의 전략적 선택에 대한 연구를 시도하였다. 또한 [6]에서는 DR을 공익적 자산으로 간주하여 DR의 합리적 거래를 위하여 DR 판매자인 DRA에 대하여 DR 구매자를 어떻게 설정할 것인가에 대해 연구하였다. [7]에서는 DRA가 전략적으로 입찰에 참여하는 모형을 가정하여 입찰함수의 파라미터를 선택하는 게임에 대한 연구를 수행하였다. [8]에서는 감축구매량 곡선을 정의하여 전력시장과 결합된 수요자원시장에서 부하간의 감축구매 경쟁을 연구하였다.

본 연구에서는 DRA가 수요반응 부하에 인센티브를 제공함으로써 부하감축에 참여하는 메커니즘을 수요함수의 가격탄력성 변화로 간주하여 수요함수 식에 DRA의 부하감축 입찰량을 포함시킨다. 따라서 DRA가 전력시장에 미치는 영향은 DR의 수요함수 변화가 시장에 미치는 영향으로 치환되도록 한다. DRA가 전략적으로 입찰량을 선택하는 상황을 Cournot 모형으로 정식화하여 DRA 경쟁의 심화에 따른 부하감축량의 변화를 분석한다. 또한 수요반응에 참여하지 않는 부하와 참여하는 부하가 공존하는 경우에 DRA의 작용은 부하전력 일부에서 감축이 아닌 증가를 유발시킬 수 있음을 알게 된다. 이는 수요반응제도의 기본 취지와는 일부 어긋나는 현상이며 본 연구에서는 이를 풍선효과(Bubble Effect)라고 명명하고 분석한다.

† Corresponding Author : Dept. of Electrical and Electronic Engineering, Dankook University, Korea.

E-mail: mania49d@dankook.ac.kr

Received : March 13, 2017; Accepted : July 23, 2017

2. 수요관리사업자의 역할

2.1 수요관리사업자와 전력시장의 관련성

전력시장에서 수요관리사업자의 역할은 DR 제도의 성패에 중요한 위치를 차지한다. 수요자원의 발굴에서부터 감축량 관리와 사후 산산처리까지를 맡고 있기 때문이다. DRA는 자신의 이득을 극대화하기 위해 수요자원 즉 전력소비자들과의 인센티브 등의 각종 계약을 맺고 전력시장에는 감축량을 전략적으로 공급하는 방식으로 중요한 역할을 하게 된다.[4] 이를 그림으로 나타내면 그림 1과 같다.

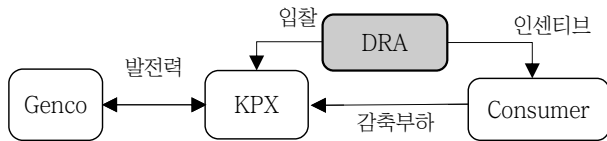


그림 1 수요관리사업자와 전력시장과의 관계도
 Fig. 1 Relation of Electricity Market and DRA

전력시장에서 부하감축량이 결정되는 과정에 수요관리사업자는 전력거래소(KPX)와 전력소비자 사이의 중간 역할을 한다. DRA가 시장상황에 맞게 전략적으로 감축부하 입찰량을 제시하면 전력소비자가 이에 반응하고 전력시장에서 발전사의 공급특성에 따라 시장가격이 결정되는 메커니즘을 모형화한다.

2.2 수요관리사업자와 수요함수

수요관리사업자와 전력소비자 사이의 인센티브 계약에 따라 전력소비자의 부하감축에 대한 반응 민감도가 달라지고 이는 전력 수요특성에 영향을 미친다. 이러한 관계를 전력수요함수에 반영하여 본 연구에서는 다음 식 (1)과 같은 DRA 수요함수를 정의한다.[4]

$$p(q_d) = \alpha - \gamma \cdot q_d - \beta \cdot \Sigma q_i \tag{1}$$

식에서 q_d 는 DRA의 감축에 대한 입찰량, p 는 시장가격, q_i 는 i 번째의 부하전력, α , β 는 수요함수의 절편과 기울기를 나타낸다. 또한 γ 는 DR 민감도로서 DRA의 입찰량 q_d 에 따라 전력소비자의 반응 민감도를 나타내며 수요함수의 절편값을 변화시킨다. 감축의 입찰이 적용되면 절편값은 α 에서 $\alpha - \gamma q_d$ 로 작아진다. 입찰량이 클수록 그리고 민감도가 강할수록 수요함수의 절편값은 더 많이 낮아진다. 입찰량에 따라 절편이 낮아지면 기울기 β 는 변하지 않으므로 동일한 가격에 대해 수요량은 작은 값을 갖고 이는 감축부하량이 증가한 것으로 해석된다.

3. 수요반응 전력시장의 모형화

3.1 수요관리사업자의 목적함수

수요관리사업자의 활동에 따른 수익구조는 국가에 따라 관련

규정에 따라 다양하게 나타난다. DRA에게 부여되는 이득이 어떠한 형태인가에 따라 수요반응 사업의 성패도 크게 달라질 것이다. 부하감축이 이루어진 경우 DRA에게 주어지는 인센티브와 전력소비자에게 제공해야하는 인센티브를 포함하여 DRA의 이득한 수를 본 연구에서는 다음 식 (2)와 같이 정의한다.

$$\pi = k \{ p_o \Sigma q_{i_o} - p(q_d) \Sigma q_i(q_d) \} - \{ \Sigma q_{i_o} - \Sigma q_i(q_d) \}^2 \tag{2}$$

여기서 첨자 o 는 부하감축을 하지 않은 경우를 의미한다. p_o , q_{i_o} 는 부하감축을 하지 않을 때의 가격과 부하전력이고, $p(q_d)$, $q_i(q_d)$ 는 DRA의 입찰량 q_d 에 따라 변화된 가격과 부하전력을 의미한다. 따라서 부하감축량은 다음 식 (3)으로 정의된다.

$$\Delta d = \Sigma q_{i_o} - \Sigma q_i(q_d) \tag{3}$$

DRA 이득식 (2)에서 첫 번째 항은 부하감축 이전에 부하측에서 지불해야하는 금액($p_o q_{i_o}$)과 부하감축에 따라 감소된 지불금액($p(q_d)$)의 차이를 나타내며 계수 k 는 가중 계수로서 DRA에게 지불하는 비율을 나타낸다. 두 번째 항은 감축부하량을 제공한 것으로 부하감축에 따라 수요반응 소비자에게 지불해야하는 인센티브 등의 비용을 나타낸다. DRA와 전력수요자의 계약형태에 따라 보상금의 정의가 달라지지만 여기서는 비교적 단순한 감축량의 제공으로 정의한다. 즉 식 (2)의 첫째항은 부하감축에 대한 대가로 시장운영자로부터 DRA가 수령하는 금액이고 둘째항은 감축을 수행한 계약수요자에게 지불하는 금액이다. 따라서 식 (2)는 수입금에서 비용을 제외하는 이득의 의미를 갖는다.

3.2 수요관리사업자와 시장의 해석모형

본 연구에서는 DRA의 전략적 입찰이 시장에 미치는 영향을 분석하기 위해 DRA는 입찰전략 q_d 에 대한 Cournot 모형으로 해석한다. 반면 발전사에 대해서는 완전경쟁과 불완전경쟁 Cournot 모형에 대해 각각 다룬다. 전력시장에서 발전사들과 DRA가 전략적 경쟁을 수행하면 감축량과 수익성의 증감이 어떻게 달라지는지를 알아보기 위해서이다.

DRA는 자신의 수익 극대화를 위해 수요반응부하의 회원 수를 늘리려고 노력할 것이다. 하지만 현재는 수요반응 회원보다는 비회원이 많을 것이고 수요함수에서도 이를 구분하여 수요반응 수요함수와 비반응 함수로 나누어 정의한다. 비반응 수요함수는 식 (1)에서 $\gamma=0$ 에 해당하는 것이다.

DR 수요함수와 비반응 수요함수가 공존할 때 DRA의 역할에 따라 회원 부하들에게서는 부하감축이 일어나지만 비회원인 비반응 수요함수에서는 반대로 부하량이 증가하는 현상을 알게 된다. 본 논문에서는 이를 DR의 풍선효과(Balloon Effect)라고 명명한다. 또한 다음 4장에서는 단일 DRA일 때와 복수의 DRA가 경쟁할 때를 분석하여 부하감축량을 비교한다.

4. 수요관리사업자의 독점과 경쟁

4.1 수요관리사업자의 독점

현재 우리나라는 DR 제도의 초기 수준이라 DR의 회원 수가 그리 많은 편이 아니다. 하지만 한국전력이 DRA로 참여하는 경우에는 회원수가 급격히 늘어날 것이다. 따라서 DRA의 독점 상황이 그리 비현실적이지는 않다. 다음 그림 2는 2개의 발전사와 독점 DRA가 존재하는 계통 및 시장상황을 나타낸다.

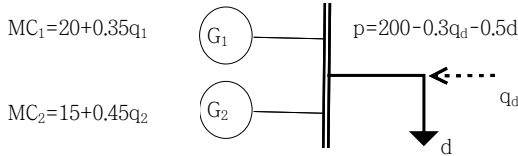


그림 2 DR 독점의 계통과 시장상황
Fig. 2 Sample System and Electricity Market Condition

그림에서 발전사 G1과 G2는 완전경쟁 모형을 따르고 한계비용 함수는 MC1과 MC2와 같다. 부하전력은 $d=(q_1+q_2)$, 감축부하 입찰량은 q_d 이고 전체 부하에서의 입찰량 반응 민감도 γ 는 0.3으로 가정한다.

완전경쟁 상태이므로 부하감축이 없을 때의 시장정산 결과는 시장가격과 한계비용이 동일한 상태에서 결정된다. 이 때의 결과는 표 1과 같다.

부하감축을 고려하는 경우는 식 (2)에서 전략변수 q_d 로 DRA 이득을 최적화함으로써 구해진다. 최적조건식 $\partial\pi/\partial q_d = 0$ 에는 $\partial p/\partial q_d$ 항이 포함되며 이는 $\partial q_1/\partial q_d$ 와 $\partial q_2/\partial q_d$ 항으로 표현된다. 입찰변수 q_d 에 따른 발전력 q_1 과 q_2 의 변화율은 한계비용과 시장가격이 동일하다는 조건($MC_1=p$, $MC_2=p$)과 수급조건($d=q_1+q_2$)으로부터 구해진다. 목적함수에서의 상대적 가중치를 $k=0.6$ 으로 두고 계산하면 표 1과 같은 결과가 나타나고 부하감축량은 $\Delta d=d_0-d=32.4$ 이다.

표 1 완전경쟁에서의 DRA 결과

Table 1 Results of DRA under Perfect Competition

	가격(p)	발전력(q)	부하전력(d)	입찰량(q_d)	감축량
no DRA	69.3	140.8	120.6	261.4	-
DRA	62.9	122.6	106.4	229.0	75.3

4.2 가중계수와 반응 민감도의 영향

수요관리사업자의 이득을 나타내는 식 (2)는 감축에 따른 인센티브 수입과 DRA의 회원 부하에 지불하는 비용으로 이루어진다. 가중계수 k 가 인센티브 수입에 곱해지므로 k 값이 클수록 지불 비용 보다는 인센티브 수입이 크게 작용하게 된다. 따라서 감축량이 증가할수록 DRA에게는 득이 되므로 보다 공격적으로 입찰

을 시도한다. 사례로서 가중계수가 10% 증가한 0.66일 때의 시장결과를 계산하면, $q_d=81.9$, $p=62.34$, $d=226.2$, $q_1=121.0$, $q_2=105.2$ 이고 부하감축량은 35.2이다. 즉 입찰 파라미터가 8.8% 증가하고 부하감축량은 8.6% 증가한다. 한편 시장가격은 0.9% 정도 감소한다.

4.3 수요관리사업자의 경쟁

DRA 간의 경쟁이 발생하는 경우를 분석하기 위해 다음 그림 3과 같이 서로 독립적인 2개의 DRA를 포함시킨다. DR 수요함수 2개를 합성하면 그림 2에서의 단일 DR 수요함수와 일치하는데 이는 4.1절에서 독점의 결과와 비교하기 위해서이다. 발전기 2대의 한계비용함수는 그림 2에서와 동일하다.

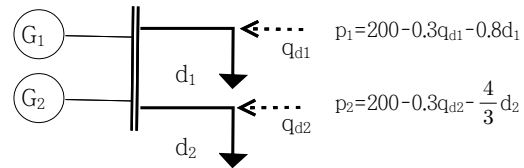


그림 3 DR 복점경쟁의 계통과 수요함수
Fig. 3 Duopoly Market of DRAs

DR 수요함수의 기울기인 0.8과 4/3를 합성하면 $0.5(=0.8 * 4/3 \div (0.8+4/3))$ 로서 4.1절의 수요함수와 일치하며 따라서 부하감축이 없는 경우는 4.1절에서의 그것과 일치한다. 단, $d_0 = [163.4, 98]$ 이다.

부하감축의 전략적 선택을 구하기 위한 복점경쟁 Cournot 모형의 내쉬균형은 서로 독립적으로 자신의 이득을 극대화하는 입찰변수선택 문제를 계산함으로써 구해진다. 즉, $\partial\pi_1/\partial q_{d1} = 0$, $\partial\pi_2/\partial q_{d2} = 0$ 의 최적조건식을 동시에 계산해야 한다. 이식에는 $\partial q_1/\partial q_{d1}$, $\partial q_2/\partial q_{d1}$, $\partial q_1/\partial q_{d2}$, $\partial q_2/\partial q_{d2}$ 항들이 포함되며 이들은 한계비용과 시장가격이 동일하다는 조건($MC_1=MC_2=p_1=p_2$)과 수급조건($d_1+d_2=q_1+q_2$)으로부터 구해진다.

가중치를 $\gamma=0.6$ 으로 동일하게 적용하여 계산한 결과는 표2와 같다. 동일한 수요특성에 대해 4.1절의 독점 DRA 때의 결과와 비교하면, DR 부하1에서는 감축량이 163.4- 138.3=25.1, DR 부하2에서는 감축량이 98-76.4=21.6이고 전체 부하감축량은 $\Delta d=261.4-214.7=46.7$ 이다.

독점에서의 결과가 32.4이니 44% 정도의 감축량 증가를 보인 것이다. 전체적으로 동일한 전력수요에 대해서 부하감축을 주도하는 DRA의 경쟁이 증가하면 부하감축의 효과가 더 커짐을 알

표 2 DRA 간의 경쟁 결과

Table 2 Results of Competition between DRAs

	가격(p)	발전력(q)	부하(d)	입찰량(q_d)	감축량		
독점 DRA	62.9	122.6	106.4	261.4	75.3		
복점 DRA	60.1	114.5	100.2	138.3	76.4		
				126.9	97.7	25.1	46.7

수 있다. 물론 이는 일반적 예상에 부합하는 결과라 할 수 있다. 하지만 DR에 반응하지 않는 비반응 수요가 존재하면 다른 현상이 나타난다.

5. 비반응 수요와 풍선효과

5.1 비반응 수요함수 포함 사례

수요관리사업자와 계약관계에 있는 부하들의 수요특성은 다음 그림 4에서 p_2 함수로 나타내고 계약을 맺지 않은 부하들의 수요함수를 p_1 함수로 나타낸다. 즉 d_1 은 수요관리를 받지 않은 부하전력이고 d_2 는 DRA의 관리를 받아 감축을 시행한 이후의 부하전력을 의미한다. 발전기의 한계비용함수는 그림 2에서와 같으며 발전사는 완전경쟁 상황이라고 가정한다. 이 경우에도 수요함수의 기울기 합성은 0.5로서 4.1절의 수요함수와 일치하며 부하감축이 없는 경우는 4.1절에서의 감축이전 상황과 일치한다. 감축이 없을 때의 d_1 과 d_2 는 $d_0=[163.4, 98]$ 이다.

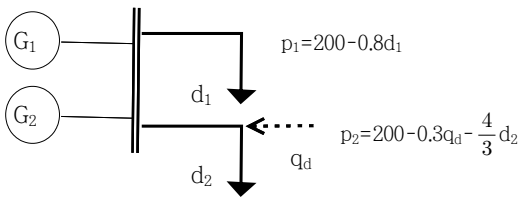


그림 4 비반응 수요함수가 포함된 전력시장
Fig. 4 Electricity Market with non-DR Demand Function

최적조건식 $\partial\pi/\partial q_d = 0$ 를 계산하여 최적의 부하감축 입찰량을 구하면 $q_d=115.5$ 이고 가격은 65.6, 부하전력은 $d_1=168$, $d_2=74.8$ 이다. 수요반응 부하인 d_2 는 98에서 74.8로 감축이 발생하지만 비반응인 d_1 은 163.4에서 168로 오히려 증가하게 된다. 합성을 하면 18.64 만큼의 부하 감축이 이뤄지기는 하지만 비반응 부하에서 반대의 현상이 나타나는 것에 주목할 필요가 있다. DRA가 관리대상 부하에 대해서 부하감축 효과가 나타나지만 관리받지 않는 부하에서는 오히려 부하증가가 이뤄지므로 이를 풍선효과(Balloon Effect)라고 부를 수가 있다.

5.2 풍선효과

풍선효과란 풍선의 한쪽을 누르면 다른 쪽이 볼록 튀어나오는 것처럼 어떤 부분의 문제를 해결하면 다른 부분에서 문제가 다시 발생하는 현상을 가리키는 말이다. 범죄사회학이나 경제현상에서 자주 사용하는 용어인데 전력시장의 DR에서도 이와 유사한 현상이 발생할 수 있음을 보여준다. 앞에서의 계산 결과를 그래프로 나타내면 다음 그림 5와 같다.

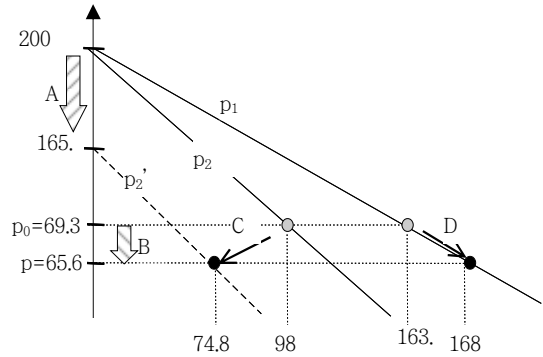


그림 5 DR 감축량의 풍선효과 분석
Fig. 5 Analysis of Balloon Effect and Load Reduction

그림은 비반응 수요함수(p_1)와 반응수요함수(p_2)에서 부하전력과 가격의 변화를 표시한 것이다. 부하감축에 대한 DRA의 전략적 입찰량인 115.5를 적용하면 반응 수요함수의 절편은 화살표 A와 같이 감소하여 165.3에 이르고 반응수요함수는 p_2' 로 표시된다. 수요함수의 변화에 따라 시장가격은 화살표 B와 같이 하락하고 부하전력도 변하게 된다. DR 부하인 d_2 는 화살표 C와 같이 23.2 만큼 감축하는 반면 비반응 부하인 d_1 은 4.6 만큼 증가한 것이다.

피크부하의 삭감을 목표로 부하감축을 유도한 것인데 DRA의 관리대상이 아닌 부하에서 반대의 현상이 발생한 것이라 부정적인 의미라고 볼 수 있다. 사례에서는 합성의 부하감축량이 18.6이었지만 부하의 감축과 증가가 동시에 발생하기 때문에 합성값이 양수가 될 수도 있다. 이는 DR 제도의 취지와는 반대 현상이라 이에 대한 검토가 필요하다.

비반응 부하전력의 변화를 Δd_1 , DR 부하전력의 변화를 Δd_2 라 할 때 균형상태에서 이를 유도하면 다음식과 같다.

$$\Delta d_1 = \frac{\gamma m_\beta}{\beta_1 \beta_2} q_d \tag{4}$$

$$\Delta d_2 = \frac{\gamma}{\beta_2} \left(\frac{m_\beta}{\beta_2} - 1 \right) q_d \tag{5}$$

$$m_\beta = \frac{1}{1/\beta_1 + 1/\beta_2 + 1/m_1 + 1/m_2} \tag{6}$$

여기서 γ , β 는 식 (1)에서의 수요함수 민감도와 기울기이고 q_d 는 DRA의 부하감축 입찰량이다.

부하감축의 합성은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} \Delta d_1 + \Delta d_2 &= \left\{ m_\beta \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} \right) - 1 \right\} \frac{\gamma}{\beta_2} q_d \\ &= \frac{-(1/m_1 + 1/m_2)}{1/m_1 + 1/m_2 + 1/\beta_1 + 1/\beta_2} \frac{\gamma}{\beta_2} q_d < 0 \end{aligned} \tag{7}$$

수요함수의 민감도와 기울기 입찰량이 양수이기 때문에 합성

값은 항상 음수임이 확인된다. 또한 비반응 부하의 반발증가율 ($\Delta d_1/\Delta d_2$)은 근사적으로 다음과 같이 유도된다.

$$\frac{\Delta d_1}{\Delta d_2} \approx -\frac{m_\beta}{\beta_1} \propto -\frac{1}{\beta_1} \quad (8)$$

식 (6)에서 알 수 있듯이 m_β 는 여러함수들의 조합으로 이루어지고 β_1 보다 작기 때문에 식 (8)과 같은 근사식이 성립한다. 마지막 항은 비반응 수요함수의 가격탄력성을 나타내므로 풍선효과는 비반응 수요함수의 가격탄력성이 높을수록 심하게 나타남을 의미한다. 따라서 DRA는 DR 참여자에게 효과를 집중시키기 위해 탄력성이 높은 부하를 우선적으로 DR에 편입시킬 필요가 있는 것이다.

6. DRA와 발전사간의 경쟁 해석

6.1 Genco와 DRA의 Cournot 모형

수요자원은 궁극적으로 발전시장에서 발전공급자들과 경쟁을 벌여야 한다. DRA와 발전사들이 동등하게 경쟁하는 상황을 분석하기 위해서 참여자 모두가 불완전 경쟁을 한다고 가정하고 Cournot 모형으로 이를 해석한다. 두 발전사는 각각 발전력 q_1 , q_2 를 전략변수로 하고 DRA는 입찰 감축량 q_d 를 전략변수로 각자의 이득을 극대화하려는 게이밍 현상을 분석한다.

발전사들과 수요함수 등의 계통 및 시장형태는 그림 4에서와 같고 한계비용함수는 그림 2에서와 동일하다. 부하감축에 대한 입찰을 하지 않은 경우는 두 발전사 간의 Cournot 균형상태에 해당되며 이는 $\partial \pi_{g1}/\partial q_1 = 0$ 과 $\partial \pi_{g2}/\partial q_2 = 0$ 두 식을 계산하여 구해진다. 또한 DRA의 전략적 입찰을 반영한 균형상태는 참여자 셋의 이득극대화 조건, 즉 $\partial \pi_{g1}/\partial q_1 = 0$, $\partial \pi_{g2}/\partial q_2 = 0$, $\partial \pi/\partial q_d = 0$ 를 계산하여 구해진다. 계산결과는 다음 표 3과 같다.

표 3 DRA와 발전사 간의 경쟁 결과

Table 3 Results of Competition btwn DRA and Gencos

	가격(p)	발전력(q)		부하전력(d)		거래량	입찰감축량
감축 이전	103.9	98.7	93.6	120.1	72.1	194.2	-
감축 이후	93.4	86.3	82.5	133.3	35.6	168.9	197.4

발전사의 과점 경쟁으로 시장가격은 완전경쟁에서보다 높아지고 거래되는 전력이 감소하는 현상은 당연하다. 여기서 주목할 부분은 비반응 부하인 d_1 의 전력이 증가했다는 것이다. DR 부하 d_2 의 감소량은 36.5, 비반응 부하 d_1 의 증가량은 13.2이고 합성 감축량은 23.3이다. 여기서도 DR의 풍선효과는 발생한다.

6.2 통합 경쟁의 결과 분석

발전사는 완전경쟁, DRA는 불완전 경쟁으로 모형화한 5절의

결과에서 감축량은 18.6이었다. 동일한 수요조건에서 발전사도 불완전 경쟁 모형으로 통합하여 변경한 결과 감축량은 23.3으로 증가하였다. 전체거래량 대비 비율을 보면 5절에서는 18.6/261로서 7% 정도인 반면 통합경쟁에서는 23.3/194로서 12% 정도로 크게 상승하였다. 작은 사례이기는 하지만 수요자원이 발전력시장에서 발전공급자와 동등하게 경쟁해도 경쟁력이 뒤쳐지지 않는다는 가능성으로 해석이 가능하다.

시장에 전략적으로 참여하여 이득극대화를 수행한 G_1 , G_2 , DRA 3자의 선택과 그에 따른 이득분포를 그림으로 나타내면 그림 6과 같다.

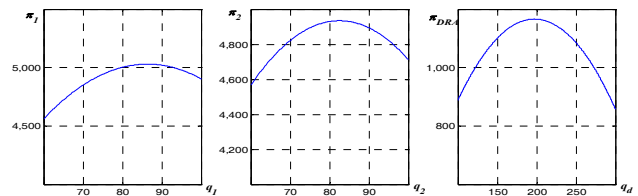


그림 6 통합경쟁 결과에서의 이득 분포도

Fig. 6 Marginal Profits of Market Competition

통합경쟁의 결과인 표 3에서 $q_1=86.3$ $q_2=82.5$ $q_d=197.4$ 일 때가 내쉬균형 임을 확인하기 위해 자신의 선택을 바꾸면서 이득을 계산한 그래프이다. 각 그래프에서 자신이 선택한 값에서 가장 큰 이득이 나타남을 알 수 있다. 따라서 내쉬균형이 검증된 것이다.

7. 결 론

부하피크 시에 부하의 자발적 감축을 유도하는 수요반응제도가 많은 관심을 받고 있다. 기대효과를 충족시키기 위한 여러 가지 요소가 있지만 본 연구에서 주목한 것은 수요관리사업자의 역할과 기능이다. 특히 인센티브를 통해 수요반응 부하의 가격 탄력성에 영향을 주고 전력시장의 가격형성에 변수로 작용하는 현상을 모형화하여 미시적 관점에서 수요관리사업자의 전략적 선택을 연구하였다.

수요관리사업자의 부하감축에 대한 입찰량을 전략변수로 Cournot 모형의 내쉬균형을 구해서 몇 가지 형태의 경쟁결과를 분석하였다. 우선 수요관리사업자들의 경쟁이 심할수록 부하감축량은 증가함을 확인하였다. 또한 수요반응에 참여하지 않는 부하전력과 수요반응 부하전력이 공존하는 경우에 균형상태에서 수요반응 부하는 감축을 하는 반면 비반응 부하는 오히려 증가하는 현상이 나타났다. 본 연구에서는 이를 풍선효과라고 표현하였다. 피크 부하를 삭감하기위해 수요반응을 시행하는 것이므로 풍선효과는 부정적인 의미라고 볼 수 있다. 이러한 풍선효과 현상은 DR 제도를 확립하고 확산하는 과정에서 검토해야할 과제이다.

수요반응자원이 전력시장에서 발전력 자원과 동등하게 경쟁하는 형태도 분석하였다. 발전사와 수요관리사업자가 모두 Cournot 과점 경쟁하는 모형에 대해서 내쉬균형을 구한 결과, 감축량은

오히려 증가함을 알 수 있었다. 이는 수요반응자원이 발전력 자원과 전력시장에서 경쟁을 하더라도 뒤처지지 않고 경쟁력이 있음을 시사하는 것이다.

References

- [1] R. Aazami, K. Aflali, M. R. Haghifam, "A Demand Response Based Solution for LMP Management in Power Market," *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 33, pp. 1125-1132, Feb. 2011.
- [2] L. Gkatzikis, I. Koutsopoulos, T. Salonidis, "The Role of Aggregators in Smart Grid Demand Response Markets," *IEEE J on Selected Areas in Communications*, Vol. 31, No. 7, July 2013
- [3] S. Maharjan, Q. Zhu, Y. Zhang, S. Gjessing, T. Basar, "Dependable Demand Response Management in the Smart Grid: A Stackelberg Game Approach," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 4, no. 1, pp. 120-132, March 2013.
- [4] E. Nekouei, T. Alpcan, and D. Chattopadhyay, "Game-Theoretic Frameworks for Demand Response in Electricity Markets," *IEEE Trans. on Smart Grid*, vol. 6, no. 2, March 2015.
- [5] Hyeok Jun Yoon, "Demand Resources Trading Market," *IEEE, Proceeding*, vol. 64, no. 4, pp. 29~33, 2015.
- [6] D. T. Nguyen, M. Negnevitsky, M. Groot, "Pool-Based Demand Response Exchange—Concept and Modeling," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 26, No. 3, pp. 1677-1684, August 2011.
- [7] L. Chen, N. Li, S.H. Low, J.C. Doyle, "Two Market Models for Demand Response in Power Networks," *IEEE International Conference on Smart Grid Communications*, pp. 397-402, 2010.
- [8] K. H. Lee and S. W. Cho, "Modeling of Demand Side Bidding in Demand Resource Market using Game Theory," *Trans. of KIEE*, vol. 59, no. 12, pp. 2143~ 2149, Dec. 2010.
- [9] D. Yang and Y. Chen, "Demand response and market performance in power economics," *IEEE Power and Energy Society General Meeting*, pp. 1~6, 2009.

저 자 소 개



이 광 호 (Kwang-Ho, Lee)

1988년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년 전력연구원위촉연구원. 2001년 미국 Univ. of Texas (Austin) 방문교수. 1996~현재 단국대 전자전기공학부 교수

Tel : 031-8005-3604

E-mail : mania49d@dankook.ac.kr