

# 재무적 송전권의 전력시장에의 영향 분석

## Analysis of the Competitive Effects of Financial Transmission Rights on Electricity Markets

金 眞 鎬\* · 朴 宗 培\*\* · 愼 重 麟\*\*\*  
(Jin-Ho Kim · Jong-Bae Park · Joong-Rin Shin)

**Abstract** - In a deregulated electricity generation market, the sufficient capacity of transmission lines will promote the competition among generation companies (Gencos). In this paper, we show that Gencos' possession of rights to collect congestion rents may increase the competition effects of the transmission lines. In order for concrete analysis on this effect, a simple symmetric market model is introduced. In this framework, introducing the transmission right to the Gencos has the same strategic effects as increasing the line capacity of the transmission line. Moreover, the amount of effectively increased line capacity is equal to the amount of the line rights. We also show that the asymmetric share of the financial transmission rights may result in an asymmetric equilibrium even for symmetric firms and markets. We also demonstrate these aspects in equal line rights model and single firm line rights model. Finally, a numerical example is provided to show the basic idea of the proposed paper.

**Key Words** : Transmission rights, Competitive electricity markets, Cournot Game

### 1. 서 론

전 세계 전력산업은 경쟁시장의 형태로 진화하고 있으며, 이에 따라 전력산업구조도 경쟁적인 형태로 발전하고 있다. 이와 같은 전력산업 구조개편이 진행됨에 따라, 전력시장의 본질적 특성 및 시장설계요소가 경쟁적 전력시장에 미치는 영향을 분석하고자 하는 데에 많은 관심이 모아지고 있다. 현재 우리나라도 발전부문의 경쟁이 도입되어 발전경쟁시장인 CBP (Cost-based Pool)가 운영되고 있는데, 이러한 발전회사의 경쟁과 관련하여 경쟁적 전력시장의 중요한 요소로 간주되고 있는 것 가운데 하나가 현물시장과 연계된 송전망 운영 분야이다. 그 동안, 경쟁적 전력시장에서 송전설비의 역할에 대한 연구가 수행되어 왔었다[1-4]. Borenstein 등은 두 전력시장을 연결하는 송전선이 전력시장에 미치는 영향에 대해 연구를 하였는데[1], 그 결과 송전선의 실제 송전량과 해당 송전선이 전력시장에 미치는 경쟁적 효과 사이에는 직접적인 연관성이 없다는 것을 결과를 제시하였으며, 미 캘리포니아 전력시장을 과점시장으로 모델링하여 이에 대한 실증적 분석결과를 도출하였다. 또한 Joskow와 Tirole은 재무적 송전권의 할당이 전력시장의 시장지배력에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였으며, 이를 통해 전력시장에 필요한 규제 장치에 대한 언급을 한 바 있다[2].

본 논문에서는, 이와 같은 전력시장의 송전선 운영이 발전회사 및 전력시장에 미치는 영향을 분석하였는데, 구체적으로 재무적 송전권의 운영방식이 경쟁적 전력시장에 존재하는 발전회사들의 전략적 행위에 미치는 영향을 해석적으로 분석하여 제시하였다. 또한 이를 통하여, 발전경쟁시장의 경쟁효과를 증진하기 위한 재무적 송전권의 역할에 대해서도 언급하였다. 본 논문에서는 이러한 이론적 전개를 위해 다음과 같은 단순화된 전력시장 모델을 사용하였다. 첫째, 전체 전력시장은 두 개의 전력시장이 지리적으로 분리된 채 하나의 송전선으로 연결되어 운영되고 있다고 가정하였다. 다음으로, 두 시장은 동일한 특성을 가지고 있다고 전제하였는데, 각 시장은 동일한 비용구조를 가지고 있는 발전회사에 의해 운영되며, 두 시장은 하나의 송전선으로 연계되어 전체 시장을 이루고 있다고 가정하였다. 또한, 전력계통의 손실은 고려하지 않았다. 본 논문에서는 먼저 각 발전회사와 전력시장에 대한 기술을 하였고, 일반적인 발전경쟁시장에서 재무적 송전권을 보유한 발전회사의 최적반응함수에 대해 분석하였다. 다음으로, 세 가지의 재무적 송전권 운영방식을 정의하고 이에 따른 상이한 시장분석 결과를 도출하였는데, 첫째, 재무적 송전권이 없는 기준모델, 둘째, 대칭적인 재무적 송전권 배분에 따른 동일 사용권 모델, 그리고, 마지막으로, 한 발전회사의 독점적인 재무적 송전권에 따른 단일 사용권 모델에 대한 분석 결과를 도출하였다. 이러한 연구를 통해, 발전회사가 재무적 송전권을 보유함에 따라 실질적인 송전선 사용량이 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 이를 통해 발전경쟁시장의 경쟁이 증진된다는 것을 보였다. 또한, 두 전력시장 및 발전회사가 대칭적이라고 하더라도, 재무적 송전권의 배분이 대칭적이지 않을 경우, 시장의 균형도 비대칭적으로 나타난다는 것을 알 수 있었다.

\* 正 會 員 : 基礎電力 工學共同研究所 前任研究員 · 工博

\*\* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 助教授 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 建國大學 電氣工學科 教 授 · 工博

接受日字 : 2003年 11月 3日

最終完了 : 2004年 4月 19日

2. 전력시장 모델

2.1 재무적 송전권

재무적 송전권(financial transmission rights)이란 전력시장의 송전혼잡을 적절히 관리하고, 전력시장참여자에게 지리적 위험의 회피 수단을 제공함과 동시에 송전망의 효율적인 투자를 촉진하기 위한 재무적 도구로서, 송전망에서 혼잡이 빈번하게 발생하는 특정 송전선을 대상으로 재무적 송전권이 각각 정의된다. 특정 선로에 대한 재무적 송전권을 보유하고 있는 시장참여자는 해당 선로에 혼잡이 발생하면 이와 관련된 혼잡수입의 일부를 권리에 비례하여 할당받게 된다. 이러한 재무적 송전권을 통해 송전시스템을 보다 효과적으로 사용할 수 있으며, 각 송전선로, 특히 혼잡이 빈번한 송전선로의 가치를 가장 많이 고려하는 시장참여자에게 해당 선로의 사용을 보장하게 된다. 재무적 송전권은 한 선로의 양 끝단 모선에 대해 정의되며, 재무적 송전권을 보유한 시장참여자는 해당 선로의 혼잡 발생 시 양 끝 모선에서의 전력가격 차에 기초하여 적절한 보상을 받게 된다[6].

예를 들어, 다음 그림 1에서 보는바와 같이, 발전회사-A가 최대송전용량 k[MW]인 선로-L (모선-a와 모선-b로 구성)에 대해  $r \in [0, 1]$  비율만큼의 재무적 송전권을 소유한 경우, 해당 선로에 혼잡이 발생하게 되면(즉, 두 모선사이의 시장가격의 차이가 발생하면), 발전회사-A는 다음과 같은 수입을 할당받게 된다. 일반적으로 이러한 재무적 송전권은 양방향으로 각기 취급되어 경매가 이루어 질 수 있지만[6], 본 연구에서는 동일한 경매를 통하여 참여자가 동시에 송전권을 획득한다는 가정을 하였다.

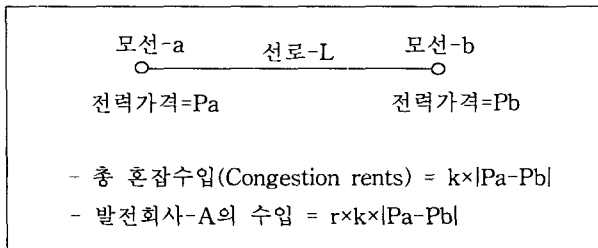


그림 1 재무적 송전권의 개념  
Fig. 1 Concept of financial transmission rights

2.2 전력시장 모델링

본 논문에서는 전체 전력시장을 구성하고 있는 두 개의 전력시장을 편의상 각기 북부시장(전력시장-n)과 남부시장(전력시장-s)이라고 정의하였다. 또한, 각 시장에서의 수요는 동일하다고 가정하였으며, 함수  $P (P : R_+ \rightarrow R_+)$ 로 표현되며 동일한 역함수로 정의된다고 가정하였다. 전력시장-n과 전력시장-s는 하나의 송전선으로 연계되어 있으며, 연계 송전선의 송전용량은 k[MW]라고 가정하였다. 각 전력시장에는 각기 유일한 발전회사가 존재한다고 가정하였는데, 전력시장-n에는 발전회사-n이, 전력시장-s에는 발전회사-s가 소비자에게 전력을 공급하고 있다고 가정하였고, 이 두 발전회사는 동

일한 발전비용함수  $C (C : R_+ \rightarrow R_+)$ 를 가지고 있다고 가정하였다. 또한, 이 전력시장에서 송전선은 제 3의 독립적인 기관에서 운영한다고 가정하였으며, 송전요금은 모선별요금제를 적용한다고 가정하였다. 여기서 제안하는 전력시장모델에서 발전회사-i ( $i=n$  or  $i=s$ )는 송전선의 혼잡 시 발생하는 혼잡수입에 대해 일정 부분을 할당받게 되는데, 발전회사-i의 할당비율을  $\gamma_i \in [0, 1]$  라고 정의하였다. 즉, 송전선 사용권을 보유한 발전회사-i는 해당 송전선의 혼잡이 발생하여 송전선 양단의 전력가격 차가 존재하면 이에 따라 발생하는 혼잡수입에 대해  $\gamma_i$  비율만큼 보상을 받게 된다. 따라서, 현물시장의 수입과 동시에 송전선 사용권에 따른 이러한 경제적 보상을 감안하여, 각 발전회사는 자사의 이익을 최대화하기 위한 전략적 의사결정을 하게 되며, 본 논문에서는 이러한 송전선 사용권이 발전회사의 전략적 행위에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 한다.

우선, 송전선에 혼잡이 발생하지 않았다고 가정하면, 이 경우 전력가격은 전체 시장에 걸쳐 동일한 값을 가지게 되며, 따라서, 각 전력시장은 두 발전회사가 공급하는 발전량의 합을 정확하게 이등분하여 소비하게 된다. 만일 송전혼잡이 발생하는 경우에는 두 전력시장의 전력가격이 다르게 결정된다. 이 경우에는 송전선의 용량인 k[MW]만큼의 전력이 혼잡 송전선에 흐르게 되고, 전력을 유입하는가 아니면 유출하는가에 따라 시장가격이 다르게 결정된다. 단, 여기서 한 가지 주목해야 할 점은, 전력시장-n과 전력시장-s를 연결하는 연계 송전선의 혼잡은 발전회사-n과 발전회사-s의 발전량 차이가 2k[MW] 보다 클 경우에만 발생한다는 것을 알 수 있다. 이를 좀더 구체적으로 살펴보면, 발전회사-i ( $i=n$  or  $i=s$ )의 발전량을  $q_i$ 라고 할 때,  $q_i < q_j - 2k$  ( $j=n,s, j \neq i$ ) 이면 혼잡이 발생하고, 이 때 전력시장-i는 전력을 유입하게 된다. 반대로,  $q_i > q_j + 2k$  이면 혼잡은 발생하지만 전력시장-i는 전력을 유출한다. 이와 같은 상황에서, 발전회사-i ( $i=n,s$ )의 이익  $\Pi_i$ 는 다음과 같이 계산됨을 알 수 있다. 단, 재무적 송전권 구입이 경매와 같은 보다 복잡한 요소를 포함하고 있어 본 논문에서는 재무적 송전권 구입에 소요되는 비용은 발전회사의 비용성분으로 고려하지 않았다.

$$\Pi_i = \begin{cases} P(q_i + k)q_i + \gamma_i k(P(q_i + k) - P(q_j - k)) - C(q_i) & \text{단, } q_i < q_j - 2k \\ P\left(\frac{q_i + q_j}{2}\right)q_i - C(q_i) & \text{단, } q_i - 2k < q_i < q_j + 2k \\ P(q_i - k)q_i + \gamma_i k(P(q_i + k) - P(q_i - k)) - C(q_i) & \text{단, } q_i > q_j + 2k \end{cases} \quad (1)$$

여기서, 식 (1)에 사용된 수요함수  $P(\cdot)$ 와 발전회사의 비용함수  $C(\cdot)$ 에 대해 다음과 같이 가정하여, 발전회사-i의 이익을 해석적으로 표현할 수 있도록 하였다.

- 1) 각 전력시장의 수요(역)함수는 다음과 같은 음의 기울기인 일차곡선(affine curve)으로 표현된다.  
$$P(q) = -\alpha q + \beta, \text{ 단, } \alpha, \beta \in R_+ \quad (2)$$
- 2) 발전회사의 비용함수는 다음과 같은 이차함수이다.

$$C(q) = \frac{a}{2} q^2 + bq + c, \text{ 단, } a, c \in R_+, b \in R \quad (3)$$

3) 발전회사(발전기)의 최대발전용량은 시장수요를 감당할 만큼 충분히 크다고 가정한다.

위의 식 (2)와 (3)을 이용하여 발전회사-i (i=n,s)의 이익  $\Pi_i$ 를 재정리하면 다음과 같이 표현된다.

$$\Pi_i = \begin{cases} (-aq_i - ak + \beta)q_i + \gamma_i k(a(q_j - q_i) - 2ak) - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c = \Pi_i^1 \\ \text{단, } q_i < q_j - 2k \\ (-a\frac{q_i + q_j}{2} + \beta)q_i - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c = \Pi_i^2 \\ \text{단, } q_j - 2k < q_i < q_j + 2k \\ (-aq_i + ak + \beta)q_i + \gamma_i k(a(q_i - q_j) - 2ak) - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c = \Pi_i^3 \\ \text{단, } q_i > q_j + 2k \end{cases} \quad (4)$$

### 3. 송전혼잡에 따른 발전회사의 최적반응

송전선 사용권을 보유한 발전회사의 최적반응을 분석하기 위해, 본 논문에서는 우선 송전혼잡이 발생하는 두 가지의 시장상황에 대한 최적반응에 대해 분석하였는데, 하나는 적극적인 최적반응(optimal aggressive output)이고, 다른 하나는 소극적인 최적반응(optimal passive output)이다. 우선, 적극적인 최적반응에 대하여 논의해보면 다음과 같다. 발전회사-i가 예측하는 시장상황이 경쟁회사인 발전회사-j가 매우 적은 양의 발전을 하고, 이로 인해 전력시장-i에서 전력시장-j로 송전혼잡이 발생한다고 예측한다고 하자. 이 경우, 발전회사-i의 최적반응은 전력시장-i에서 전력시장-j로 송전혼잡이 발생한 상황 하에 자신의 이익을 최대화하기 위한 최적의 발전량을 결정하는 것으로 정의할 수 있다. 따라서, 모선별요금제 하에서, 이러한 발전회사-i의 최적발전량은 전력시장-j로 k[MW]만큼의 수요가 이전된 후, 전력시장-i에서 발전회사-i가 독점적 지위를 가질 때 결정되는 최적발전량(monopoly output)으로 생각할 수 있다. 이와 같은 적극적인 최적반응을 정리하면 다음과 같다.

정의 1) 전력시장-i로부터 전력시장-j로 k[MW]의 전력이 유입되어 송전혼잡이 발생한 경우,  $\gamma_i$ 의 혼잡수입 보상비율을 보유한 발전회사-i의 이익을 최대화하는 발전량을  $q_i^+(k, \gamma_i)$ 라고 정의하면, 이 발전량은 발전회사-j가  $q_j^+(k, \gamma_i) - 2k$  보다 적은 발전량을 생산하여, 전력시장-i로부터 전력시장-j로 혼잡이 발생하는 경우에 이를 발전회사-i의 적극적인 최적반응이라고 한다. 이 때,  $q_i^+(k, \gamma_i)$ 는 다음과 같은 과정을 통해 구할 수 있다.

$$q_i^+(k, \gamma_i) = \arg \max_{q_i} [(-aq_i + ak + \beta)q_i + \gamma_i k(a(q_i - q_j) - 2ak) - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c] \quad (5)$$

다음으로, 소극적인 최적반응에 대하여 고려하면 다음과 같다. 발전회사-i가 예측하는 시장상황이 경쟁회사인 발전회사-j가 매우 많은 양의 발전을 할 것이라고 하자. 즉, 발전회사-j가 전력시장-j로부터 전력시장-i로 송전혼잡이 발생할 정도로 발전을 할 것이라고 발전회사-i가 예상한다고 생각할 수 있다. 이 경우에도 발전회사-i의 최적반응은 전력시장-j로부터 전력시장-i로 혼잡이 발생한 상황에서 자신의 이익을 최대화하기 위한 최적의 발전량을 결정하는 것으로, 이 최적발전량은 수요가 k[MW] 만큼 전력시장-i로 이전된 후 발전회사-i의 독점적 이익을 최대화하는 발전량(monopoly output)으로 결정된다고 볼 수 있다. 이상의 소극적 시장결과를 정리하면 다음과 같다.

정의 2) 전력시장-j로부터 전력시장-i로 k[MW]의 전력이 유입되어 송전혼잡이 발생한 경우,  $\gamma_i$ 의 혼잡수입 보상비율을 보유한 발전회사-i의 이익을 최대화하는 발전량을  $q_i^-(k, \gamma_i)$ 라고 정의하면, 이 발전량은 발전회사-j가  $q_j^-(k, \gamma_i) + 2k$  보다 많은 발전량을 생산하여 시장-j로부터 시장-i로 혼잡이 발생하는 경우에 발전회사-i의 소극적인 최적반응이라고 한다. 이 때,  $q_i^-(k, \gamma_i)$ 는 다음과 같은 과정을 통해 구할 수 있다.

$$q_i^-(k, \gamma_i) = \arg \max_{q_i} [(-aq_i - ak + \beta)q_i + \gamma_i k(a(q_j - q_i) - 2ak) - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c] \quad (6)$$

이상 송전선 혼잡이 발생하는 두 가지 경우에 대한 발전회사의 최적반응, 즉 적극적인 최적반응 및 소극적인 최적반응 이외에도, 송전혼잡이 발생하지 않는 경우에 발전회사의 최적반응을 고려할 필요가 있으며, 이는 다음과 같은 과정을 통해 정리할 수 있다.

정의 3) 송전선에 혼잡이 발생하지 않고 발전회사-j의 발전량이  $q_j$ 인 경우, 발전회사-i의 이익을 최대화하는 최적발전량을  $q_i^C(q_j)$ 라고 정의하면, 이 최적발전량은 발전회사-j가  $q_j$  만큼 발전하고 있는 경우에 발전회사-i의 이익을 최대화하는 코넛 최적반응(Cournot best response)이다. 이러한 발전회사-i의 Cournot 최적반응은 다음과 같은 과정을 통해 계산할 수 있다.

$$q_i^C(q_j) = \arg \max_{q_i} [(-a\frac{q_i + q_j}{2} + \beta)q_i - \frac{a}{2} q_i^2 - bq_i - c] \quad (7)$$

식 (7)에서 볼 수 있듯이, 발전회사-i의 코넛 최적반응은 k나  $\gamma_i$ 의 함수가 아니라,  $q_j$ 의 함수라는 것을 알 수 있다. 이상 위에서 표현된 식 (5), (6), 그리고 (7)을 풀면 재무적 송전권을 보유한 발전회사-i의 적극적인 최적반응, 소극적인 최적반응, 그리고 Cournot 최적반응을 각각 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_i^+(k, \gamma_i) = \frac{\beta + (1 + \gamma_i)ak - b}{2\alpha + a} \quad (8.1)$$

$$q_i^-(k, \gamma_i) = \frac{\beta - (1 + \gamma_i)ak - b}{2\alpha + a} \quad (8.2)$$

$$q_i^C(q_j) = -\frac{\alpha}{2(\alpha + a)} q_j + \frac{\beta - b}{\alpha + a} \quad (8.3)$$

4. 재무적 송전권 모델링

4.1 기준 모델 (Reference model)

본 논문에서는 송전선사용권 분석을 위해 기준모델(reference model)을 정의하였는데, 어떤 발전회사도 재무적 송전권을 보유하고 있지 않은 경우를 기준모델이라고 상정하였다. 이러한 기준모델에서 발전회사-i의 적극적 최적반응과 소극적 최적반응 및 코넷 최적반응을 각각  $q_i^{+R}(k), q_i^{-R}(k), q_i^{CR}(q_j)$  이라고 하면, 이 값들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_i^{+R}(k) = q_i^+(k, 0) = \frac{\beta + ak - b}{2\alpha + a}, \quad \text{단, } i = n, s \quad (9.1)$$

$$q_i^{-R}(k) = q_i^-(k, 0) = \frac{\beta - ak - b}{2\alpha + a}, \quad \text{단, } i = n, s \quad (9.2)$$

$$q_i^{CR}(q_j) = q_i^C(q_j) = -\frac{\alpha}{2(\alpha + a)} q_j + \frac{\beta - b}{\alpha + a}, \quad \text{단, } i = n, s \quad (9.3)$$

위의 식 (9.1)과 (9.2)에서 알 수 있듯이, 기준모델에서 적극적 최적반응 및 소극적 최적반응은 발전회사-i와 발전회사-j에 관계없이 동일하게 결정된다. 이러한 기준모델 결과는 Borenstein 등이 제시한 대형 두 발전회사 모델의 결과와 동일한 것으로, 송전용량 k에 따라 발전회사의 최적반응이 다르게 결정됨을 알 수 있다[1]. 즉, 송전용량 k가 매우 작으면, 시장의 균형은 존재하지 않으며[5], k 값이 매우 충분히 큰 경우, 각 발전회사의 최적반응은 코넷 최적반응으로 결정되며, 동시에 이 값이 유일한 시장균형이다. 이러한 기준모델에서의 시장균형 결과는 그림 2와 그림 3에 나타나 있다.

그림 2에서 보면, 발전회사-n의 발전량이 매우 적은 경우 ( $q_n < q_i^{+R}(k) - 2k$ ), 발전회사-s의 최적반응은 적극적 최적반응( $q_i^{+R}$ )이 되고, 발전회사-n의 발전량이  $q_i^{+R}(k) - 2k < q_n < q_{sw}$  인 범위에서 발전회사-s의 최적반응은 발전회사-n의 발전량보다 2k 만큼 많이 발전하는 것이며, 발전회사-n의 발전량이  $q_n > q_{sw}$  이면 발전회사-s의 최적반응은 소극적 최적반응인  $q_i^{-R}$  이 된다. 만일, 발전회사-n의 발전량이  $q_i^{+R}(k) - 2k < q_n < q_{sw}$  인 범위에서 발전회사-s의 발전량이 발전회사-n의 발전량보다 2k 만큼 크지 않으면, 송전선로에 혼잡이 발생하지 않으므로 이익 최대화를 위해 발전회사-s는 코넷 균형점까지 발전량을 늘리길 원하지만, 이 경우 송전용량 제약으로 인해 코넷 균형까지 발전하지 못한 채 송전혼잡에 걸리게 된다. 따라서, 발전회사-s의 최적발전량은 발전회사-n의 발전량보다 2k 만큼 큰 것이며, 이것은 발전회사-n의 발전량이  $q_i^{+R}(k) - 2k < q_n < q_{sw}$  인 범위에서 발전회사-s의

적극적인 최적반응이라고 할 수 있다.

그러나, 그림 3에서 보는 바와 같이 송전용량 k가 증가하게 되면, 코넷 반응함수가 가능해 영역으로 들어오기 때문에 발전회사-s는 발전회사-n의 발전량보다 2k 만큼 많이 발전하는 것보다는 코넷 반응함수를 따라 발전하는 것이 더 이익이 된다. 그림 3은 이러한 경우를 보여주고 있다. 발전회사-n이  $q_{sw}$ 보다 많은 발전을 하는 경우 발전회사-s의 최적발전량은 소극적 최적반응  $q_i^{-R}(k)$  임을 알 수 있다. 여기서,  $q_{sw}$ 는 발전회사-s가 발전회사-n의 발전량보다 2k 만큼 많이 또는 코넷 반응함수에 의한 발전량만큼 발전하는 것보다 소극적 최적반응으로 전환하여 발전하는 것이 더 이익이 되는 발전량으로 정의할 수 있으므로 다음과 같은 방정식의 해로부터  $q_{sw}$ 를 구할 수 있다.

$$\Pi_i^1 |_{q_i = q_i^{+R}} = \Pi_i^3 |_{q_i = q_{sw} + 2k \text{ 또는 } q_i = q_i^{CR}(q_{sw})} \quad (10)$$

단,  $\Pi_i^1, \Pi_i^3$ 는 각각 식 (4)에서 정의된 첫 번째 및 세 번째 식이다.

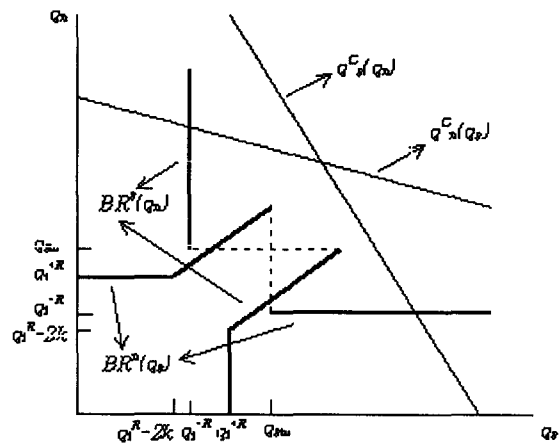


그림 2 기준모델에서 각 발전회사의 최적반응함수(1)  
Fig. 2 Best response function of each Genco in the reference model(1)

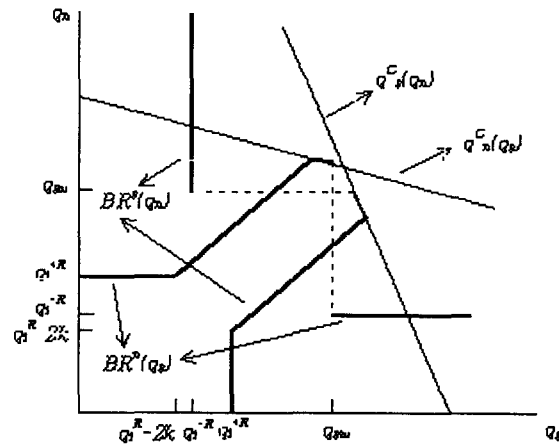


그림 3 기준모델에서 각 발전회사의 최적반응함수(2)  
Fig. 3 Best response function of each Genco in the reference model(2)

4.2 동일 송전권 모델 (Equal transmission right model)

동일 송전권 모델에서는 각 발전회사가 동일하게 재무적 송전권을 보유하고 있다고 가정하는데, 즉  $\gamma_i = \frac{1}{2}$  ( $i=n,s$ ) 이다. 이러한 동일 송전권 모델 하에서 발전회사- $i$ 의 적극적 최적반응과 소극적 최적반응 및 코넷 최적반응을 각각  $q_i^{+E}(k), q_i^{-E}(k), q_i^{CE}(q_j)$  라고 하면, 이 값들은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_i^{+E}(k) = q_i^+(k, \frac{1}{2}) = \frac{2\beta + 3ak - 2b}{4\alpha + 2a} \quad (11.1)$$

$$q_i^{-E}(k) = q_i^-(k, \frac{1}{2}) = \frac{2\beta - 3ak - 2b}{4\alpha + 2a} \quad (11.2)$$

$$q_i^{CE}(q_j) = q_i^C(q_j) = -\frac{\alpha}{2(\alpha + a)} q_j + \frac{\beta - b}{\alpha + a} \quad (11.3)$$

위의 식 (11.1)-(11.3)과 식 (9.1)-(9.3)을 비교해 보면 다음과 같은 식이 성립한다는 것을 알 수 있다.

$$q_i^{+E}(k) = q_i^{+R}(\frac{3}{2}k) \quad (12.1)$$

$$q_i^{-E}(k) = q_i^{-R}(\frac{3}{2}k) \quad (12.2)$$

$$q_i^{CE}(q_j) = q_i^{CR}(q_j) \quad (12.3)$$

식 (12.1)-(12.3)을 통해 알 수 있는 것은, 두 전력시장의 각 발전회사가 동일한 비율로 재무적 송전권을 보유하게 되면 각 발전회사는 자사의 이익을 최대화하기 위한 전략적 행위를 하게 되고, 그 결과, 재무적 송전권이 없는 기준모델의 재무적 송전용량을 1.5배 증가시키는 효과를 가져 온다는 것이다. 이와 같은 결과가 도출되는 이유는, 발전회사가 재무적 송전권을 보유함으로써 송전혼잡이 발생하여 두 시장의 가격차가 생기는 경우 추가적인 수입이 발생하기 때문으로 이해할 수 있다. 즉, 발전회사- $i$ 가 전력시장- $i$ 로부터 전력시장- $j$ 로 송전혼잡을 발생하도록 충분히 많은 발전량을 생산하는 적극적인 행동을 취하게 되면, 두 전력시장의 전력가격차가 생겨 발전회사- $i$ 에 혼잡수입이 발생하게 되는데, 이에 따라 발전회사- $i$ 는 더욱 발전량을 늘리는 적극적인 행동을 지속하게 되고 이에 따른 시장가격차 및 혼잡수입을 더 늘리려고 하게 된다. 반면, 발전회사- $j$ 가 매우 적은 양을 발전하는 소극적인 행동을 하게 되면 전력시장- $j$ 로부터 전력시장- $i$ 로 송전혼잡이 발생하는 경우에도, 두 전력시장의 가격차에 따른 발전회사- $i$ 의 혼잡수입이 생기게 되고, 이에 따라 발전회사는 발전량을 더 줄여 가격차를 더 증가시키고 이에 따라 혼잡수입을 더욱 증가하려 하는 소극적인 행위를 지속하게 된다. 단, 식 (12.3)에서 볼 수 있듯이, 코넷 최적반응은 재무적 송전권과 무관함을 알 수 있는데, 이는 송전혼잡이 발생하지 않으면 재무적 송전권이 발전회사의 수익에 미치는 영향이 없으며, 두 전력시장이 하나의 시장으로 통합되는 효과를 나타내기 때문이다.

발전회사의 한계수입 및 한계비용 분석을 통해서 이러한 송전용량의 증대효과를 분석할 수 있다. 식 (4)를 통해, 전력시장- $i$ 에서 전력시장- $j$ 로 혼잡이 발생하는 경우, 동일 송전권

모델 하에 발전회사- $i$ 의 한계수입은 기준모델에서의 한계수입보다  $0.5ak (>0)$  만큼 크다는 것을 알 수 있다. 반면, 발전회사의 한계비용은 동일 송전권 모델과 기준모델의 경우가 동일하다는 것을 알 수 있다. 즉, 혼잡수입으로 발전회사의 한계수입은 증가하는 반면 한계비용은 변하지 않게 되어, 한계이익이 증가한다는 것을 알 수 있다. 따라서, 재무적 송전권을 보유한 발전회사- $i$ 는 자사의 이익을 최대화하기 위해 재무적 송전권이 없는 기준모델에 비해 발전량을 늘리게 된다. 반대로, 전력시장- $j$ 에서 전력시장- $i$ 로 혼잡이 발생하는 경우, 동일 송전권 모델에서 발전회사- $i$ 의 한계수입은 기준모델의 한계수입보다  $0.5ak$  만큼 작으며, 한계비용에는 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서, 이 경우에는 발전회사- $i$ 가 이익을 최대화하기 위해 기준모델보다 발전량을 줄이게 된다. 이러한 두 가지 경우를 종합해보면, 두 발전회사가 동일한 재무적 송전권을 보유함으로써, 기존의 송전용량을 재무적으로  $0.5k$  만큼 증가시켜 원래 용량의 1.5배의 재무적 송전권을 확보하는 효과를 나타내게 되며, 이러한 결과는 앞의 분석결과와 동일함을 알 수 있다.

이와 같은 재무적 송전권을 통한 재무적 송전용량의 증대 효과를 통해, 전력시장 특히 발전시장부문의 경쟁효과가 증가함을 알 수 있는데, 재무적 송전권이 없는 기준모델에서 순수 전략 코넷 균형이 존재하지 않는 경우에도 재무적 송전권을 도입함으로써 시장에 코넷 균형이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그림 2 및 그림 3에서 보는 바와 같이, 송전용량이 코넷 균형이 존재하도록 하는 임계점보다 작은 경우, 재무적 송전권이 없을 때는 순수전략균형이 존재하지 않는다. 즉, 적은 송전용량으로 인해 각 발전회사의 최적반응함수는 불연속점을 갖게 되며 이로 인해 두 발전회사의 최적반응함수는 교점을 갖지 않고, 이에 따라 순수전략균형이 존재하지 않게 된다 [5]. 그러나, 이 경우에 재무적 송전권을 도입함으로써 송전선의 재무적 유효용량이 증대되고 이에 따라 최적반응함수의 불연속점이 코넷 균형점 또는 그 이상에서 존재하여 코넷 균형이 존재함을 알 수 있는데, 그림 4는 이러한 기준모델에 재무적 송전권을 도입한 동일 송전권 모델에서 각 발전회사의 최적반응함수를 보여주고 있다. 그림 4에서 알 수 있듯이, 송전선의 재무적 유효용량이 증대됨에 따라, 각 발전회사는 소극적 최적반응에 해당하는 발전량 ( $q_i^{-R}$ )으로부터 얻는 이익보다 코넷 균형점 ( $q_i^{CR}$ )에서 얻게 되는 이익이 더 크게 된다. 따라서, 코넷 균형이 존재하도록 하는 임계 송전용량은 다음과 같은 식을 통해 결정됨을 알 수 있다.

$$\Pi_i^1 |_{q_i = q_i^{-R}} = \Pi_i^2 |_{q_i = q_i^{CR}, q_j = q_j^{CR}} \quad (13)$$

4.3 단일 송전권 모델 (Single transmission right model)

단일 송전권 모델은 한 발전회사가 재무적 송전권을 독점하고 있는 상황을 말하는데, 이에 따라  $\gamma_i = 1, \gamma_j = 0$  ( $i=n,s, j=n,s, i \neq j$ )이 된다. 이러한 단일 송전권 모델에서 발전회사- $i$ 의 적극적 최적반응과 소극적 최적반응을 각각  $q_i^{+S}(k), q_i^{-S}(k)$  라고 정의하고, 발전회사- $j$ 의 적극적 최적

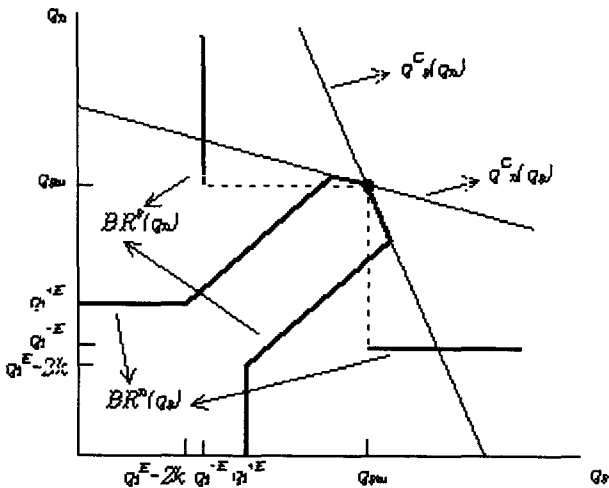


그림 4 동일 송전권 모델에서 각 발전회사의 최적반응함수  
 Fig. 4 Best response curve of each Genco in a equal transmission right model

반응과 소극적 최적반응을 각각  $q_j^{+S}(k)$ ,  $q_j^{-S}(k)$  라고 정의하며, 발전회사-i 및 j의 코넷 최적반응을 각각  $q_i^{CS}(q_j)$ ,  $q_j^{CS}(q_i)$  라고 정의하면, 이 값들은 다음과 같이 계산된다.

$$q_i^{+S}(k) = q_i^{+}(k, 1) = \frac{\beta + 2ak - b}{2\alpha + a} \quad (14.1)$$

$$q_i^{-S}(k) = q_i^{-}(k, 1) = \frac{\beta - 2ak - b}{2\alpha + a} \quad (14.2)$$

$$q_j^{+S}(k) = q_j^{+}(k, 0) = \frac{\beta + ak - b}{2\alpha + a} \quad (14.3)$$

$$q_j^{-S}(k) = q_j^{-}(k, 0) = \frac{\beta - ak - b}{2\alpha + a} \quad (14.4)$$

$$q_i^{CS}(q_j) = -\frac{\alpha}{2(\alpha + a)} q_j + \frac{\beta - b}{\alpha + a} \quad (14.5)$$

$$q_j^{CS}(q_i) = -\frac{\alpha}{2(\alpha + a)} q_i + \frac{\beta - b}{\alpha + a} \quad (14.6)$$

위의 식 (14.1)-(14.6)를 식 (9.1)-(9.3)과 비교하면 다음과 같은 결과가 도출됨을 알 수 있다.

$$q_i^{+S}(k) = q_i^{+R}(2k) \quad (15.1)$$

$$q_i^{-S}(k) = q_i^{-R}(2k) \quad (15.2)$$

$$q_j^{+S}(k) = q_j^{+R}(k) \quad (15.3)$$

$$q_j^{-S}(k) = q_j^{-R}(k) \quad (15.4)$$

$$q_i^{CS}(q_j) = q_i^{CR}(q_j) \quad (15.5)$$

$$q_j^{CS}(q_i) = q_j^{CR}(q_i) \quad (15.6)$$

이러한 결과를 통해, 단일 송전권 모델에서는 기준모델에 비해 발전회사-i에게는 재무적 송전용량이 2배로 증가한 효과가 있는 반면, 발전회사-j는 송전용량의 변화를 느끼지 못하게 된다. 이와 같은 결과는, 발전회사-i가 재무적 송전권을 독점함으로써 송전혼잡으로 인한 추가적인 수입이 발생하기

때문이며, 재무적 송전권을 보유하지 못한 발전회사-j에게는 이러한 추가적인 수입이 발생하지 않기 때문이다. 한계수입 관점에서 이러한 결과를 해석해보면, 발전회사-i는 송전혼잡이 시장-i에서 시장-j로 발생하는 경우  $ka$  만큼의 추가수입이 생기고, 송전혼잡이 시장-j에서 시장-i로 발생하는 경우  $-ka$  만큼의 추가수입이 생기므로, 발전회사-i의 전략적 행동 측면에서 볼 때, 재무적 송전용량이 추가적으로  $k$ 만큼 증가하여 원래 용량의 2배로 증가한 효과가 있다. 단, 혼잡이 발생하지 않는 경우에는 발전회사-i와 발전회사-j의 최적반응 발전량에 변화가 없음은 당연한 결과로 볼 수 있다.

이와 같은 비대칭적인 재무적 송전권의 배분으로 인해 송전용량이 비대칭적으로 증가하게 되고, 이로 인해, 비록 두 전력시장 및 발전회사가 대칭적이라 하더라도, 시장의 균형이 비대칭적으로 나타나는 것을 알 수 있다. 이러한 비대칭적인 시장균형은 수요함수와 발전비용함수, 송전용량 등과 같은 시장 여건에 따라 다양한 형태로 나타나는 것을 알 수 있는데, 첫째, 유일한 시장균형이 존재하는 경우, 둘째, 순수전략균형이 존재하지 않는 경우, 셋째, 비계약 (비혼잡) 코넷 균형이 존재하는 경우, 그리고 마지막으로 복수 개의 시장균형이 존재하는 경우가 있다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 유일한 시장균형이 존재하는 경우에는, 발전회사-s는 적극적인 최적반응  $q_i^{+S}$ 을 나타내고, 발전회사-n은 소극적인 최적반응  $q_j^{-S}$ 을 나타내게 된다. 다음으로, 그림 6에서 보는 바와 같이 순수전략균형이 존재하지 않는 경우가 있으며, 이 경우 두 발전회사의 최적반응함수가 교점을 갖지 않게 된다. 마지막으로 그림 7에서 보는 바와 같이, 복수 개의 시장균형 즉, 적극적/소극적 시장균형과 비계약 코넷 균형이 동시에 존재하는 경우가 있는데, 적극적/소극적 균형에서 발전회사-s는 적극적인 최적반응  $q_i^{+S}$ 을 나타내고, 발전회사-n은 소극적인 최적반응  $q_j^{-S}$ 을 나타내는 반면, 코넷 균형에서 두 발전회사는 비계약 코넷 균형 발전량  $q_i^C$ 를 나타내게 된다. 비계약 코넷 균형만이 존재하는 경우는 앞의 기준모델의 경우와 동일한 결과이므로 여기에서는 생략했다.

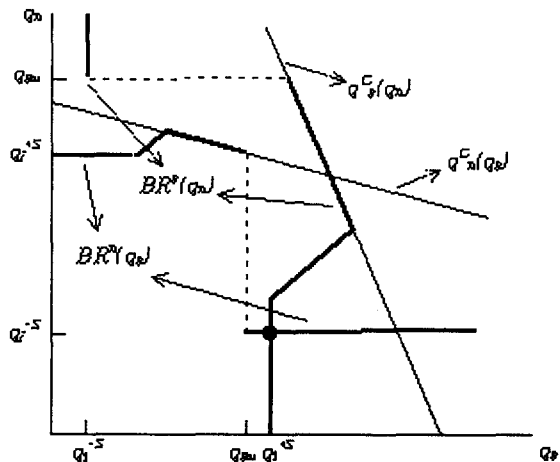


그림 5 유일한 시장균형이 존재하는 단일 송전권 모델  
 Fig. 5 Single transmission right model with an unique market equilibrium

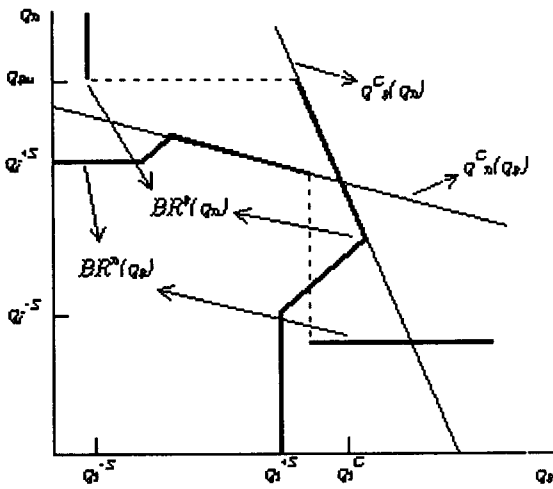


그림 6 순수전략 균형이 존재하지 않는 단일 송전권 모델  
 Fig. 6 Single transmission right model without pure market equilibria

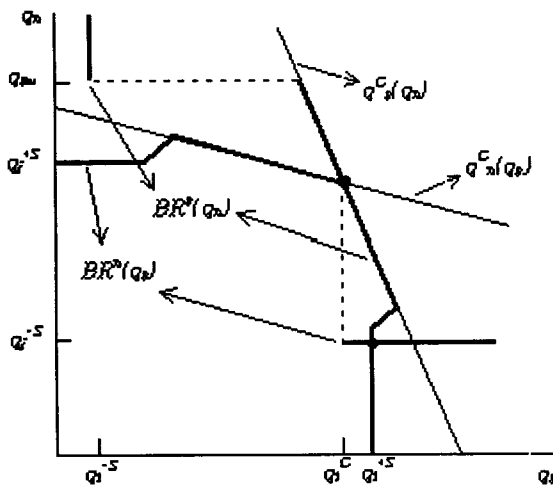


그림 7 복수 개의 시장 균형이 존재하는 단일 송전권 모델  
 Fig. 7 Single transmission right model with multiple market equilibria

5. 사례 연구

본 논문에서 제안된 이론적 개념의 설명을 돕기 위해 단순한 예제계에 대한 사례연구를 수행하였다. 다음과 같은 간단한 전력시장 및 전력시스템을 상정하였으며, 아래와 같은 샘플 시스템에 대하여 재무적 송전권의 기본모델과 동일송전권 모델 및 단일송전권 모델에 대한 본 논문에서 제안된 분석 결과를 적용하였다.

- (i) 시장 수요함수:  
 $\alpha = 1.0, \beta = 10.0$  즉,  $P(q) = -1.0q + 10.0$
- (ii) 발전기 비용함수 계수:  
 $a = 0.003124, b = 7.92, c = 0.1$  (16)

(iii) 연계송전용량:  $k=0.6$

우선, 두 발전회사 모두 재무적 송전권을 보유하고 있지 않은 기준모델에 대하여, 발전회사-i의 적극적 최적발전량과 소극적 최적발전량 및 비계약 코너 균형에서의 최적발전량 결과는 다음과 같이 나타났다.

$$q_i^{+R}(k) = 1.337, q_i^{-R}(k) = 0.738, q_i^{CR} = 1.384 \quad (i=n,s) \quad (17)$$

다음으로, 기준모델에서 비계약 코너 균형이 존재하기 위한 임계 송전용량  $k^*$  및 발전회사-i의 최적반응함수의 불연속점에 해당하는 송전용량  $q_{sw}$  는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$k^* = 0.814, q_{sw} = 1.353 \quad (18)$$

따라서, 앞에서 분석한 결과를 적용해 보면, 주어진 예제계의 경우, 기준모델에서는 두 발전회사의 최적반응함수가 교점을 갖지 않으며, 이에 따라 순수전략 균형이 존재하지 않게 된다. 그러나, 재무적 송전권을 도입한 동일송전권 모델을 예제계에 적용해 보면, 재무적 유효 송전용량 ( $k'$ )이 기준모델과 비교해 1.5배 증가하게 된다 ( $k' = k * 1.5 = 0.9$ ). 따라서, 이러한 재무적 유효 송전용량  $k'$ 은 비계약 코너 균형이 존재하기 위한 임계송전용량  $k^*$ 보다 크므로, 샘플시스템의 동일송전권 모델에서는 비계약 코너 균형점이 존재하여 그림 4와 같이 시장균형을 이루게 됨을 알 수 있다.

마지막으로, 비대칭적인 재무적 송전권을 상정한 단일 송전권 모델의 경우 (단,  $\gamma_i = 1, \gamma_j = 0$ ), 발전회사-i와 발전회사-j의 적극적/소극적 최적발전량 및 코너 균형발전량은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$q_i^{+S}(k) = 1.637, q_i^{-S}(k) = 0.440, q_j^{+S}(k) = 1.338, q_j^{-S}(k) = 0.779, q_i^{CS} = 1.384 \quad (\text{단, } i=n,s, j=n,s, i \neq j) \quad (19)$$

위의 비대칭적인 결과에서 알 수 있는 것처럼, 재무적 송전권을 확보하고 있는 발전회사-i는 기준모델에 비해 재무적 유효 송전용량이 2배 증가한 것으로 인식하여, 적극적 최적발전량이 증가하였으나, 발전회사-j는 재무적 송전권을 보유하고 있지 않기 때문에 기준모델 결과와 동일하게 발전하는 것이 최적임을 알 수 있다. 코너 균형점 역시 송전 비계약 균형점이기 때문에 기준모델 결과와 동일한 결과가 도출됨을 알 수 있다. 주어진 샘플시스템에 이러한 단일송전권 모델을 적용할 경우, 그 결과는 그림 7과 같이 복수 개의 균형점이 도출됨을 알 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 재무적 송전권을 도입함으로써 발전경쟁시장의 경쟁 및 효율이 향상될 수 있다는 것을 해석적인 방법을 통해 증명하였으며, 간단한 예제계를 통해 본 논문에서 제안한 방법의 개념적 설명을 제공하였다.

재무적 송전권 제도를 도입하지 않은 기준모델의 경우와 비교할 때, 동일송전권 모델의 경우 재무적 유효송전용량이 1.5배, 단일송전권 모델의 경우 재무적 유효송전용량이 2배까지 증가한다는 것을 알 수 있었으며, 이러한 재무적 도구를 통해, 각 발전회사는 실질적인 송전용량의 증대 없이도, 경쟁을 증진시키는 재무적 유효송전용량의 증대를 경험하게 된다는 것을 알 수 있었다.

송전용량이 적은 경우 ( $k < k^*$ ), 비제약 코너 균형점에 이르기 전에 송전혼잡이 발생하여 일반적으로 시장의 균형이 존재하지 않지만, 이와 같이 균형이 존재하지 않는 시장에 재무적 송전권을 도입함으로써 재무적 유효송전용량이 증가하게 되고, 이에 따라 시장의 균형이 존재하게 되어 전력시장의 경쟁이 증진된다는 것을 알 수 있었다. 또한, 재무적 송전권이 비대칭적으로 배분되면, 전력시장이 대칭적이라 할지라도, 시장의 균형이 비대칭적으로 나타남을 알 수 있었다. 이러한 비대칭 시장모형의 경우 (본 논문의 경우, 단일송전권 모델), 균형점이 다르게 존재하는 몇 가지 경우에 대한 존재 조건 및 해석적 분석이 필요하며, 재무적 송전권 모델에 대한 좀더 심도 있는 연구가 필요하다. 본 논문에서는 이러한 재무적 송전권 하에서 발전회사의 전략적 행위를 분석하고 시장의 균형을 해석하여 재무적 송전권의 효과를 제공하였으나, 이를 대규모 시스템에 적용하기 위해서는 이론적 확장 및 가정의 현실화 등의 과정이 필요하며, 현실적인 실제 시장의 문제를 고려해야 하는 한계점도 동시에 가지고 있다. 또한, 재무적 송전권 구입이 경매와 같은 보다 복잡한 요소를 포함하고 있어 본 논문에서는 재무적 송전권 구입에 소요되는 비용은 발전회사의 비용성분으로 고려하지 않았으나, 향후 이를 포함하는 통합적인 연구가 필요하다고 판단된다.

**감사의 글**

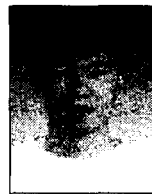
이 논문은 산업자원부에서 시행한 전력산업 인프라 구축지원 사업으로 수행된 논문입니다.

**참 고 문 헌**

[1] Severin Borenstein, James Bushnell, and Steven Stoff, "Competitive effects of transmission capacity in a deregulated electricity industry," RAND Journal of Economics, Vol. 31 (2000), pp 294-325  
 [2] P. Joskow and J. Tirole, "Transmission Rights and Market Power on Electric Power Network," RAND Journal of Economics, Vol. 31 (2000), pp 450-487  
 [3] F. Sheweppe, M. Caramanis, R. Tabors, and R. Bohn, Spot pricing of electricity, Boston, Kluwer Academics, 1998

[4] L. Cunningham, R. Baldick, and M. Baughman, "An empirical study of applied game theory: Transmission constrained cournot behavior," IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 17 (2002), pp. 166-172  
 [5] Drew Fudenberg and Jean Tirole, Game Theory, The MIT Press, 1991  
 [6] Mohammad Shahidehpour and Muwaffaq Alomoush, Restructured Electrical Power Systems, Marcel Dekker, 2001

**저 자 소 개**



**김진호 (金眞鎬)**

1995년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 현재 기초전력공학공동연구소 전력경제연구센터 선임연구원.

Tel : 02-886-3101 Fax : 02-886-3102  
 E-mail : gmji@plaza.snu.ac.kr



**박종배 (朴宗培)**

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3483  
 E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



**신중린 (愼重麟)**

1949년 9월 22일생. 1977년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 건국대학교 공과대학 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3487  
 E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr