

경쟁적 전력시장에서 발전기 증감발률을 고려한 다중시간 발전량 배분 게임

| |
|--------|
| 논 문 |
| 60-3-7 |

Multi-Stage Generation Allocation Game Considering Ramp-rate Constraints

박 용 기* · 박 종 배** · 노 재 형*** · 김 형 중§ · 신 중 린†
(Yong-Gi Park · Jong-Bae Park · Jae Hyung Roh · Hyeong-Jung Kim · Ju-Seong Kim)

Abstract - This paper studies a novel method to find the profit-maximizing Nash Equilibriums in allocating generation quantities with consideration of ramp-rates under competitive market environment. Each GenCo in a market participates in a game to maximize its profit through competitions and play a game with bidding strategies. In order to find the Nash equilibriums it is necessary to search the feasible combinations of GenCos' strategies which satisfy every participant's profit and no one wants various constraints. During the procedure to find Nash equilibriums, the payoff matrix can be simplified as eliminating the dominated strategies. in each time interval. Because of the ramp-rate, generator's physically or technically limits to increase or decrease outputs in its range, it can restrict the number of bidding strategies of each generator at the next stage. So in this paper, we found the Nash Equilibriums for multi-stage generation allocation game considering the ramp-rate limits of generators. In the case studies, we analyzed the generation allocation game for a 12-hour multi-stage and compared it with the results of dynamic economic dispatch. Both of the two cases were considered generator's ramp-rate effects.

Key Words : Generation allocation game, Game theory, Competitive market, Ramp rate, Profit maximization

1. 서 론

전력산업이 독점적 환경하에서 경쟁적 환경으로 변화하면서 개별 발전사업자들은 더 이상 비용최소화가 목적이 아니라 자신의 이익극대화를 위해 시장에 참여하고 있다. 시장 참여자인 발전사업자는 가격과 발전량을 시장에 입찰하고 이를 바탕으로 시장에서는 시장가격과 개별 발전사업자의 발전전력량을 결정한다. 이 때 입찰과정에서 각 시장참여자들은 자신의 이익 극대화를 위한 합리적인 전략을 수립하는 것이 중요한데, 이를 위해서는 먼저 상대방의 전략을 예측하고 그에 따라 자신의 최적 전략을 선택하여 입찰해야한다. 따라서 전력산업에서도 참여자들 사이의 게임이 진행되고 있다.

최근 전력시장을 분석하기 위해 게임이론[1-3]을 적용한 여러 연구들이 진행되고 있는데, 대부분 경기자인 발전사업자는 자신의 이익극대화를 위해 발전량과 가격을 순수전략(Pure Strategy) 혹은 혼합전략(Mixed Strategy)을 입찰전략으로 시장에 참여하는 형태로 전력거래게임의 내쉬균형점을 찾는 방법론을 제시하고 있다. Ferrero 등은 경쟁적 전력

시장에서의 전력거래 게임을 정적 완비정보게임으로 2인 게임을 진행하였고[4], Park 등은 최적반응함수로부터 얻은 연속함수로부터 선정된 입찰가격을 통해 참여자의 이익을 얻게 되는 방법론을 제시하였다[5]. 또한 Baldick 등은 꾸르노 모델을 이용하여 송전제약을 존재할 경우의 시장참여자들의 이익을 극대화할 수 있는 최적전략함수를 해석하는 연구를 수행하였고[6], Deb 등 또한 발전계약과 송전계약, 예비력시장까지 포함하는 목적함수를 이끌어냄으로써 다자 꾸르노 내쉬균형점을 도출할 수 있는 방법론을 제시하였다[7]. Lee 는 이러한 송전계약 하에서 지역 간 분리현상으로 발생하는 복합전략에 대한 다자간 게임에 대한 내쉬균형을 도출하였다[8]. Cihan 등은 독립적으로 존재하는 에너지시장과 FTR(financial transmission right)에 각각에 대한 시장참여자인 발전사업자와 수용가의 입찰전략을 결합한 결합입찰전략(joint bidding strategies)으로 2단계행렬게임(two-tier matrix game)으로 전력거래 게임을 해석하였다[9].

상기의 연구들은 모두 한 시간대의 수요를 만족하는 정적인 목적함수를 해석하여 해를 도출하였는데 전력산업은 대용량 저장에 대한 한계로 전기를 끊임없이 공급해야하는 연속적인 특성을 가지고 있기 때문에 각 발전사업자는 매시간 변동하는 수요를 고려하여 입찰전략을 변경하면서 지속적으로 게임에 참여하는 다중시간에 대한 전력거래 게임을 진행하게 된다. 여기서 발전사업자는 발전기의 여러 가지 기술적인 동적 특성을 고려하여 입찰발전량을 조정해야하는데, 특히 발전기 증감발률[10-11]이 입찰 발전전략을 선택하는데 중요한 변수이다. 발전기 증감발률을 고려한다면 발전사업자는 선택가능 전략의 변화로 인해 다중시간에 대한 전력

* 정 회 원 : 건국대 전기공학과 박사과정
** 정 회 원 : 건국대 전기공학과 교수 · 공박
*** 정 회 원 : 건국대 전기공학과 조교수 · 공박
§ 정 회 원 : 에너지관리공단 수요관리실 팀장 · 공박
† 교신저자, 정회원 : 건국대 전기공학과 교수 · 공박
E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr
접수일자 : 2010년 12월 7일
최종완료 : 2011년 2월 17일

거래게임에서의 입찰전략을 한 시간대에 진행하는 정적 게임의 입찰전략보다 제한받게 된다. 이를 해석하기 위해 [12]에서는 발전기의 기술적 특성인 증감발률을 고려하여 다중 시간대에 대한 내쉬균형점을 역진귀납법으로 찾는 방법론을 제시하였다. 역진귀납법의 경우에는 게임의 진행되는 동안 발생하는 총 경우의 수를 모두 고려해야 된다는 한계가 존재하며 개별 게임의 진행 수(시간대)가 증가하면 고려대상 경우의 수가 기하급수적으로 증가하기 때문에 해를 도출하는데 어려움이 있다.

본 논문에서는 이러한 전략조합의 수를 줄이기 위한 방법으로 발전기 증감발률을 적용한 다중시간대에 대한 전력거래 게임을 순차적으로 각 시간대별 내쉬균형점 도출하였다. t 시간대에서 발전사업자가 선택할 수 있는 발전량 입찰전략을 바탕으로 구성된 보수행렬에서 내쉬균형점을 찾고, 그에 따라 선택된 발전전략으로 발전기 증감발률을 적용하여 $t+1$ 시간대에서 선택할 전략이 결정된다.

새로운 전략이 선택되면 t 시간대까지 찾은 시간대별 내쉬균형전략들과의 조합을 통해 $t+1$ 시간대의 새로운 보수행렬을 구성하여 내쉬균형점을 반복적으로 찾는다. 또한 각 시간대별로 존재하는 열등전략을 제거함으로써 전체적인 입찰전략의 경우의 수를 상당히 줄이는 효과를 얻을 수 있고 그에 따라 통합적 내쉬균형점들을 이끌어내는 시간 또한 크게 줄일 수 있다. 상기에서 제시한 방법론으로 본 논문의 사례연구에서는 다중시간대에 대한 2인 전력거래 게임을 진행하였다.

2. 발전기 증감발률을 고려한 기존 경제급전 문제

발전회사의 발전비용은 일반적으로 발전량에 대한 이차다항식으로 표현한다. t 시간대에서 발전회사 i 의 발전량을 P_i 라고 하면 비용함수는 아래 식(1)과 같다.

$$C_i^t = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \tag{1}$$

여기서, $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 는 발전기 i 의 운전비용계수이다. 상기의 비용함수를 반영하여 계통의 손실 및 예비력과 전력의 수요에 대한 탄력성을 무시한다고 가정하면 T 시간동안 N 개 발전기에 대한 비용최소화를 위한 동적부하배분은 다음과 같이 최적화 문제로 정식화할 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N C_i^t = \text{Min} \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^N \{ \alpha_i P_i^{t2} + \beta_i P_i^t + \gamma_i \} \tag{2}$$

$$\sum_i P_i^t = P_L^t \tag{3}$$

$$P_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \tag{4}$$

$$P_i^t \geq P_i^{t-1} \text{ 일 때, } 0 \leq P_i^t - P_i^{t-1} \leq P_i^{RU} \tag{5}$$

$$P_i^t \leq P_i^{t-1} \text{ 일 때, } 0 \leq P_i^{t-1} - P_i^t \leq P_i^{RD} \tag{6}$$

여기서,

- P_L^t : t 시간에서의 총수요, ($t=1, 2, \dots, T$)
- \underline{P}_G : 발전기 i 의 최소발전량
- \bar{P}_G : 발전기 i 의 최대발전량
- P_G^{RU} : 발전기 i 의 증발률 한계
- P_G^{RD} : 발전기 i 의 감발률 한계

식(2)는 동적부하배분의 목적함수로 총시간대의 모든 발전기들의 비용이 최소가 되는 문제를 의미한다. 식(3)은 수급조건에 대한 등식제약조건이며, 식(4)는 개별 발전기의 발전량 한계에 관한 부등식제약조건이다. 식(5)와 식(6)은 각각 발전기에 대한 증발률과 감발률을 계단형 함수로 가정한 부등식 제약조건이며[10-11], t 시간대에서의 발전량은 $t-1$ 시간대에 대한 발전량에서 증발률(혹은 감발률)을 초과하지 않는 범위 내에서 출력을 조정해야 된다. 상기의 비용최소화에 대한 최적화문제는 여러 가지 해법이 존재하는데 그 중 동적계획법을 적용한 라그랑지 승수법으로 해를 도출할 수 있다[13].

3. 경쟁시장에서의 발전량 배분게임

3.1 전력거래게임 모형

경쟁적 시장 하에서는 계통전체의 비용최소화보다 개별 발전회사의 입장에서 자신의 이익 극대화에 초점이 맞추어져 있고, 각 발전회사는 전략적인 행동을 통해 자신의 이익을 극대화할 수 있는 방향으로 상대 발전회사들과 경쟁하게 된다. 따라서 발전량 배분 문제는 더 이상 식(2)와 같이 계통 전체적인 비용최소화를 목적으로 하는 함수가 아니라 아래 식(7)과 같이 T 시간 동안 발전사업자의 개별 이익이 극대화될 수 있는 목적함수를 만족시키는 해를 도출하는 문제로 전환된다. 따라서 개별 시장참여자들은 경쟁자들의 전략을 분석하여 자신의 전략을 선택하여 시장에 가격과 입찰량을 결정할 것이므로 이는 시장에서의 참여자들 간의 게임으로 해석되어진다.

$$\text{Max} \sum_{t=1}^T \Pi_i^t = \text{Max} \sum_{t=1}^T \lambda^t P_i^t - C_i^t, \forall i \tag{7}$$

여기서,

- Π_i^t : 발전기 i 의 t 시간대의 이익
- λ^t : t 시간대의 시장가격

본 논문에서 적용한 풀코(PoolCo)모형에서의 전력거래 게임은 각 시장 참여자(즉, 각 발전사업자)들은 게임의 경기자(Player)이고, 각 참여자들의 입찰가격과 입찰전력량은 게임의 전략(strategy)이 된다. 이때 발전사업자의 입찰가격은 한계비용을 기반으로 한다고 가정하면 입찰전력량에 따라 입찰가격이 결정되므로 각 경기자들의 전략은 입찰전력량으로 정하도록 한다. 시장에서는 계통운영자가 시간대별 부하에 따라 각 경기자의 입찰전력량을 받아 시장가격을 결정하고 각 발전사업자들에게 발전량을 할당하게 된다. 각 시장참여자들은

결정된 시장가격과 할당받은 발전량을 통해 수입과 이익을 산출할 수 있다. 경쟁 환경 하에서 게임을 진행하기 위해 본 논문에서는 시장 환경에 대한 아래와 같은 몇 가지 가정을 두기로 한다.

- ① 시장 참여자는 둘 또는 그 이상이 존재하며 각 발전사업자들이 입찰한 전력량은 계통부하 전체에 공급할 수 있어 전력 부족 현상이 일어나지 않는다.
- ② 전력시장에는 단 하나의 전력 Pool 만이 존재하고 모든 발전회사들은 의무적으로 Pool에 참여한다.
- ③ 시장에 참여하는 각 발전회사들은 자신이 보유한 모든 발전기에 대해 입찰하되, 각 발전기의 비용에 따라 여러 발전량으로 나누어 입찰할 수 있다.
- ④ 가격은 시장참여자인 발전회사의 한계비용을 통해 계통한계가격(SMP)으로 결정되며 이러한 한계비용에 따라 계통운영자(ISO)가 각 발전회사들이 발전량을 할당한다.
- ⑤ 발전회사와 수용가 간의 쌍무계약은 존재하지 않는다.
- ⑥ 시장에서 수요의 가격탄력성은 무시한다.
- ⑦ 가격결정 시 송전손실과 계통혼잡과 같은 계통 제약조건들은 무시한다.
- ⑧ 발전사업자는 시장에 참여한 경쟁사들의 비용함수 등을 모두 추정할 수 있다.

본 논문에서는 게임에 참여한 모든 발전사업자들의 발전기 정보는 경쟁사 간 추정이 가능하다고 가정하였으므로 모든 발전기의 비용함수 계수인 $\alpha_i, \beta_i, \gamma_i$ 의 값과 발전기의 최대출력과 최소출력 및 발전기 증감발률 등의 정보를 알 수 있고, 그에 따라 상대방의 보수를 예측할 수 있기 때문에 본 논문에서 진행하는 전력거래게임은 완비정보게임이며, 모든 참여자들이 동시에 전력시장에 입찰하기 때문에 t 시간대에서 상대방이 어떤 전략을 선택하였는지는 알지 못하므로 불완전정보게임이기도 하다.

3.2 전력거래게임의 정식화

T 시간 동안 시장에 참여하는 각 전력사업자들은 t 시간대에서 k 개의 입찰전략을 가질 때, 발전사업자 i 의 입찰가능 전략집합을 $S_i^t = \{P_{i,1}^{t,bid}, P_{i,2}^{t,bid}, \dots, P_{i,k}^{t,bid}\}$ 로 정의할 수 있다. 각 시간대에서 발전사업자(발전기)들의 입찰발전량을 받은 시장운영자(ISO)는 발전사업자들의 비용함수에 대한 한계비용을 바탕으로 시장가격을 결정하고, 각 발전사업자가 보유한 발전기들의 해당 시간대에서의 발전량을 할당한다. 이익함수에 반영되는 개별 발전사업자의 발전량은 이러한 ‘할당된발전량’으로 결정되며 할당된 발전량으로 산출된 이익이 내쉬균형을 찾는 보수행렬(payoff matrix)을 구성하게 된다. 개별 발전사업자의 비용은 식(8)에 따라 결정된다.

$$C_i^t = \alpha_i + \beta_i P_i^{t,allocated} + \gamma_i P_i^{t,allocated^2} \quad (8)$$

게임이 진행되는 동안 t 시간대에서 $t+1$ 로 이동할 때 이산적인 특성으로 가정한 식(5), 식(6)의 발전기 증감발률은 t 시간에 ‘할당된발전량’을 바탕으로 $t+1$ 시간에 발전사업

자의 입찰전략조합 생성에 제약을 준다. 즉 $t+1$ 시간대에서의 각 발전기의 전략은 t 시간에 할당받은 발전량에 증감발률 제약을 고려하여 결정된다. 또한 식(3)의 t 시간대의 총 수요는 개별 발전사업자(발전기)가 할당받은 발전량의 총합과 같아야 한다. 따라서 T 시간동안의 전력거래게임의 목적함수와 제약식은 다음과 같이 할당된 발전량에 관한 문제로 정리된다.

목적함수:

$$Max \sum_{i=1}^T \Pi_i^t = Max \sum_{i=1}^T \left\{ \lambda^t P_i^{t,allocated} - \left\{ \lambda^t - (\alpha_i + \beta_i P_i^{t,allocated} + \gamma_i P_i^{t,allocated^2}) \right\}, \forall i \right. \quad (9)$$

제약조건:

$$\sum_i^n P_i^{t,allocated} = P_L^t \quad (10)$$

$$\underline{P}_i \leq P_i \leq \bar{P}_i \quad (11)$$

$$P_i^{t,allocated} \geq P_i^{t-1,allocated} \text{ 일 때,}$$

$$0 \leq P_i^{t,allocated} - P_i^{t-1,allocated} \leq P_i^{RU} \quad (12)$$

$$P_i^{t,allocated} \leq P_i^{t-1,allocated} \text{ 일 때,}$$

$$0 \leq P_i^{t-1,allocated} - P_i^{t,allocated} \leq P_i^{RD} \quad (13)$$

여기서,

- $P_G^{t,allocated}$: 시간 t 에서 각 발전기에 할당되는 발전량

4. 전력거래 게임의 진행

T 시간 동안의 전력거래게임에서 내쉬균형은 통합적인 시간에 대한 모든 전략조합을 고려하여 탐색된다. 각 발전사업자가 시간대별로 입찰전략이 k 개씩 가질 때, T 시간 동안 각 발전사업자가 가지는 총 전략조합의 수는 k^T 개씩이며, N 개의 발전사업자가 구성하는 보수행렬 내 성분의 경우의 수는 $(k^T)^N$ 가 되는데, 이는 현실적으로 컴퓨터 메모리 초과 문제로 인해 결과를 찾는 데 한계가 발생한다. 만약 경우의 수가 메모리 한계 이내에 존재한다고 해도 총 경우의 수를 해석하기에 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서는 이러한 전략조합의 기하급수적으로 증가하는 문제점을 줄이는데 초점을 맞추었고, 이를 위해 각 시간대에서 순차적으로 내쉬균형을 탐색하는 방법으로 게임을 진행하였다.

또한 각 시간대에서는 전략조합에 따른 해당시간까지의 보수행렬이 만들어지는데, 여기서 개별 발전사업자들은 자신의 전략조합 중 상대방의 전략선택과는 무관하게 항상 다른 전략조합에 비해 이익이 적은 전략조합이 존재하게 된다. 이러한 열등전략들은 제거할 수 있다. 전략조합의 수를 줄이고 그에 따라 해를 도출하는 시간을 줄이기 위해 이러한 열등전략(dominated strategies)들은 다음 시간대로 게임이 진행되기 전에 제거하였다.

<Payoff Matrix at t=1>

| | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | $(s_B^{1,1})^1$ | $(s_B^{1,2})^2$ | $(s_B^{1,3})^3$ | $(s_B^{1,4})^4$ |
| $(s_A^{1,1})^1$ | $(\Pi_A^{1,(1,1)}, \Pi_B^{1,(1,1)})$ | $(\Pi_A^{1,(1,2)}, \Pi_B^{1,(1,2)})$ | $(\Pi_A^{1,(1,3)}, \Pi_B^{1,(1,3)})$ | $(\Pi_A^{1,(1,4)}, \Pi_B^{1,(1,4)})$ |
| Nash Equilibrium 1 At t=1 | $(s_A^{1,2})^2$ | $(\Pi_A^{1,(2,1)}, \Pi_B^{1,(2,1)})$ | $(\Pi_A^{1,(2,2)}, \Pi_B^{1,(2,2)})$ | $(\Pi_A^{1,(2,3)}, \Pi_B^{1,(2,3)})$ |
| | $(s_A^{1,3})^3$ | $(\Pi_A^{1,(3,1)}, \Pi_B^{1,(3,1)})$ | $(\Pi_A^{1,(3,2)}, \Pi_B^{1,(3,2)})$ | $(\Pi_A^{1,(3,3)}, \Pi_B^{1,(3,3)})$ |
| | $(s_A^{1,4})^4$ | $(\Pi_A^{1,(4,1)}, \Pi_B^{1,(4,1)})$ | $(\Pi_A^{1,(4,2)}, \Pi_B^{1,(4,2)})$ | $(\Pi_A^{1,(4,3)}, \Pi_B^{1,(4,3)})$ |
| | | | | Nash Equilibrium 2 |

<Payoff Matrix at t=2>

| | | | | | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| | $(s_B^{1,nash1}, s_B^{2,1})^1$ | $(s_B^{1,nash1}, s_B^{2,2})^2$ | $(s_B^{1,nash1}, s_B^{2,3})^3$ | $(s_B^{1,nash2}, s_B^{2,1})^4$ | $(s_B^{1,nash2}, s_B^{2,2})^5$ | $(s_B^{1,nash2}, s_B^{2,3})^6$ |
| $(s_A^{1,nash1}, s_A^{2,1})^1$ | $(\Pi_A^{2,(1,1)}, \Pi_B^{2,(1,1)})$ | $(\Pi_A^{2,(1,2)}, \Pi_B^{2,(1,2)})$ | $(\Pi_A^{2,(1,3)}, \Pi_B^{2,(1,3)})$ | X | X | X |
| $(s_A^{1,nash1}, s_A^{2,2})^2$ | $(\Pi_A^{2,(2,1)}, \Pi_B^{2,(2,1)})$ | $(\Pi_A^{2,(2,2)}, \Pi_B^{2,(2,2)})$ | $(\Pi_A^{2,(2,3)}, \Pi_B^{2,(2,3)})$ | X | X | X |
| $(s_A^{1,nash1}, s_A^{2,3})^3$ | $(\Pi_A^{2,(3,1)}, \Pi_B^{2,(3,1)})$ | $(\Pi_A^{2,(3,2)}, \Pi_B^{2,(3,2)})$ | $(\Pi_A^{2,(3,3)}, \Pi_B^{2,(3,3)})$ | X | X | X |
| $(s_A^{1,nash2}, s_A^{2,1})^4$ | X | X | X | $(\Pi_A^{2,(4,4)}, \Pi_B^{2,(4,4)})$ | $(\Pi_A^{2,(4,5)}, \Pi_B^{2,(4,5)})$ | $(\Pi_A^{2,(4,6)}, \Pi_B^{2,(4,6)})$ |
| $(s_A^{1,nash2}, s_A^{2,2})^5$ | X | X | X | $(\Pi_A^{2,(5,4)}, \Pi_B^{2,(5,4)})$ | $(\Pi_A^{2,(5,5)}, \Pi_B^{2,(5,5)})$ | $(\Pi_A^{2,(5,6)}, \Pi_B^{2,(5,6)})$ |
| $(s_A^{1,nash2}, s_A^{2,3})^6$ | X | X | X | $(\Pi_A^{2,(6,4)}, \Pi_B^{2,(6,4)})$ | $(\Pi_A^{2,(6,5)}, \Pi_B^{2,(6,5)})$ | $(\Pi_A^{2,(6,6)}, \Pi_B^{2,(6,6)})$ |
| Nash Equilibrium 1 At t=2 | | | | Nash Equilibrium 2 At t=2 | | Nash Equilibrium 3 At t=2 |

그림 1 순차적 보수행렬 구성 및 내쉬균형점 도출
Fig. 1 Procedure Sequentially Searching Nash Equilibriums

4.1 내쉬균형의 순차적 탐색

본 논문에서 순차적 내쉬균형을 찾는다는 것은 각 시간대에서 구성된 보수행렬에서 내쉬균형을 찾고, 이들 내쉬균형점들이 가지는 전략조합만을 다음시간대의 전략조합에 포함시킨다는 의미이다. 예를 들어, A와 B 두 발전사업자가 참여한 시장에서 t=1 시간대의 수요에 대한 입찰전략을 2개씩 가진다면 그림 1와 같이 입찰전략에 대한 보수행렬을 구성할 수 있다. 여기서 찾은 내쉬균형점은 두 개이고, 그 전략쌍이 각각 $(s_A^{1,nash1}, s_B^{1,nash1})$, $(s_A^{1,nash2}, s_B^{1,nash2})$ 라고 하면 t=2 시간대에서는 보수행렬에 대한 입찰전략 구성을 그림에 따라 앞선 t=1에서의 내쉬균형점만을 반영하면 된다. t=2에서 A와 B가 가지는 전략수가 3개씩이라면 그림과 같이 내쉬균형점 2개가 반영되어 $2 \times 3 = 6$ 개의 전략조합을 각각 가지게 되고 새로운 보수행렬을 구성할 수 있다.

이때, t=1시간대에서의 내쉬균형점이 반영되지 않는 성분들은 보수행렬 상에서 제거된다. t=3 시점에서 또한 동일한 방법으로 t=2 시간대에서 찾아진 내쉬균형점들을 통해 전략조합을 생성한다. 이러한 방법으로 T시간 동안 순차적으로 통합적 내쉬균형점을 도출할 수 있다. 여기서 보수행렬 내의 전략인 (s_i^t, k) 는 발전사업자 i의 t시간에서의 k번째 입찰전략이며, l은 보수행렬 상에서 행과 열(즉, 각 발전사업자의 전략조합)을 의미한다. 또한 $(\Pi_{A,(m,n)}^t, \Pi_{B,(m,n)}^t)$ 은 t시간대에 구성된 보수행렬의 (m,n) 성분(입찰전략 조합)에서의 A, B 발전사업자 각각의 이익이다.

이러한 순차적인 내쉬균형점 도출과정은 각 시간대의 내쉬균형점들의 경로를 따라 최종적인 내쉬균형에 대한 전략조합을 구하는 것이므로, 동적계획법(dynamic programming)을 이용한 해의 도출과정과 유사한데[13], 동적계획법

과는 다르게 각 시간대별로 존재하는 내쉬균형점이 하나가 아닌 다수가 존재한다는 차이점이 있다.

4.2 열등전략의 제거

앞서 언급한 바와 같이 T시간동안 게임이 진행되면서, 내쉬균형점들은 순차적으로 각 시점의 조합된 입찰전략으로 얻게 되는 이익으로 구성된 보수행렬에서 구한다. 이때 경기자인 발전사업자(발전기)가 가지는 전략들 가운데 상대 경기자의 전략선택과는 무관하게 항상 다른 전략보다 이익이 낮은 열등전략(dominated strategies)들이 존재하게 된다 [1]. 그림 2와 같이 경기자 A의 전략 중 $S_{A,1}$ 는 $S_{A,2}$ 보다 경기자 B의 전략 선택과 무관하게 항상 적은 보수를 갖게 되므로 열등전략이 되고 이러한 열등전략은 보수행렬에서 제거할 수 있다. 열등전략을 제거함으로써 보수행렬의 크기는 더욱 줄일 수 있어 내쉬균형 해를 찾는 시간을 더욱 단축시킬 수 있다.

| | | | | | |
|-----------|------------|------------|-----|---------------|-------------|
| | $S_{B,1}$ | $S_{B,2}$ | ... | $S_{B,m-1}$ | $S_{B,m}$ |
| $S_{A,1}$ | Π_{11} | Π_{12} | ... | $\Pi_{1,k-1}$ | $\Pi_{1,k}$ |
| | \wedge | \wedge | ... | \wedge | \wedge |
| $S_{A,2}$ | Π_{21} | Π_{22} | ... | $\Pi_{2,k-1}$ | $\Pi_{2,k}$ |

그림 2 보수행렬에서 열등전략 제거
Fig. 2 Elimination of A's Dominated Strategies in a Payoff Matrix

4.3 동적 전력거래게임의 진행

발전기 증감발률을 고려한 다중 시간 동안의 동적 전력거래 게임을 발전사업자(발전기)의 기준에서 다음과 같은 순서로 통합적 내쉬균형점들을 도출하였다.

Step 1 t 시간대의 각 경기자에 대한 전략을 입찰전력량으로 세운다. 발전기의 최소출력한계와 최대출력 사이에서 이산적인 값으로 입찰전력량을 선택하여 시장에 입찰하도록 한다.

$$S_i^t = \{P_{i,k}^{t,bid} \mid P_i \leq P_{i,k}^{t,bid} \leq \overline{P}_i\}$$

Step 2 t 시점에서의 선택 가능한 전략은 앞서 진행한 $t-1$ 시점에서 찾은 내쉬균형점들에 대한 전략조합을 반영하여 새로운 전략조합을 구성하고 보수행렬을 만든다.

Step 3 계통운영자는 각 발전사업자의 입찰발전량을 고려하여 발전기의 한계비용($\lambda_i = \beta_i + 2\gamma_i P_i$)을 기반으로 t 시간대에서의 시장가격(λ)을 결정하고 개별 발전사업자에 t 시간대의 발전량($P_{i,k}^{t,allocated}$)을 할당한다. 이 때, 보수행렬 내에서 전력수급에 대한 제약조건을 만족하지 못하는 성분은 제외하도록 설정한다. 시장가격에 대한 각 발전사업자의 발전량은 다음식과 같이 산출된다.

$$P_i^{t,allocated} = \frac{\lambda^t - \beta_i}{2\gamma_i} \quad (14)$$

Step 4 각 경기자는 결정된 시장가격과 발전기에 할당된 발전량을 기준으로 전략에 대한 이익을 산출하여 해당 시간대의 보수행렬을 구성한다. 이때 보수행렬은 $t-1$ 시점에서의 내쉬균형점들에 대한 이익과의 합으로 구성된다.

Step 5 구성된 보수행렬에서 각 발전사업자의 열등전략을 찾아 제거한다.

Step 6 보수행렬 상에서 내쉬균형점들을 찾는다.

Step 7 t 시간대에서 각 발전기는 할당받는 전력량을 기준으로 발전기의 증감발률 제약 내에 있는 발전량을 $t-1$ 시간대에서 입찰 전략으로 선택하고 다시 step 1-6 과정을 반복하면서 최종적인 T 시간동안의 통합적인 내쉬균형점들을 찾는다.

5. 사례연구

본 논문에서는 2개의 발전사업자가 12시간 동안 경쟁하는 전력거래게임에 대한 해(내쉬균형)를 구하였다. 또한 동일한 두 개의 발전기의 비용최소화를 위한 동적부하배분 문제를 풀어 두 문제의 해를 비교하였다. 발전기의 비용함수의 각 계수는 및 발전량 한계는 표 1과 같고 각 발전기의 두 발전기의 증감발률의 경우 증발률과 감발률을 모두 100[MW/h] 로 설정하였다. 12시간동안의 시간대별 수요는 표 2와 같다.

표 1 발전기 입력 자료

Table 1 Units Input Data

| Unit | 비용함수 계수 | | | 발전량 한계 | | 발전기 증감발률 [MW/h] |
|------|------------|-----------|------------|------------------------|-----------------------|-----------------|
| | α_i | β_i | γ_i | \underline{P}_i [MW] | \overline{P}_i [MW] | |
| G1 | 200 | 7.92 | 0.001562 | 150 | 600 | 100 |
| G2 | 100 | 7.85 | 0.001940 | 100 | 500 | 100 |

표 2 시간대별 수요

Table 2 Demands for 12 hours

| 시간 [h] | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 수요[MW/h] | 800 | 860 | 900 | 920 | 910 | 830 |
| 시간 [h] | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
| 수요[MW/h] | 880 | 900 | 880 | 870 | 850 | 860 |

CASE 1. 동적 전력거래게임

각 발전사업자의 입찰 전력량은 G_1, G_2 모두 50[MW] 단위로 선택가능하다고 가정하면, 전력거래게임의 시작점인 $t=1$ 에서 각 발전기의 최소발전량과 최대발전량 사이의 값을 50[MW] 단위로 입찰전력량을 결정하도록 한다. 상기의 게임진행순서를 따라 최종적인 12시간 동안의 전력거래게임의 내쉬균형은 총 20개가 도출되었고 그 결과는 표 3, 표 4와 같다. 표 3은 각 시점에서의 내쉬균형의 시장가격이고 표 4는 시장가격으로 인해 할당된 발전량을 반영한 개별 발전사업자의 이익을 정리하였다. 각 시간대별로 개별 발전기에 할당된 발전량은 시장가격이 한계비용을 기준으로 책정되었기 때문에 식(14)에 의해 산출할 수 있다.

앞서 언급하였듯이 하나의 보수행렬에서도 여러 개의 내쉬균형점이 존재하기 때문에 보수행렬 내의 탐색 초기위치를 어떻게 설정하느냐에 따라 다른 균형점이 찾아질 수 있고, 이러한 초기위치를 변화시켜 가면서 보수행렬 내에 존재하는 내쉬균형점들을 찾았다. 게임의 결과로 얻어진 내쉬균형점들의 순서는 무작위로 초기치를 결정하여 먼저 찾아진 균형점의 순서이며, 순서가 앞선다고 해서 다른 내쉬균형점들 보다 비교우위에 있는 것은 아니다.

Case 2: 동적부하배분 문제

다음은 동일한 문제를 계통 전체의 비용최소화의 목적인 동적배분문제로 결과를 도출하였다. 라그랑지 승수법을 이용하여 해를 구하였고 그 결과는 표 5와 같다.

ISO에 의해 결정된 발전량에 따른 12시간 동안 두 발전기의 총 비용은 \$94,013 이고, 각 시간대별로 결정된 가격에 반영한 총 이익은 \$4,305 이다.

전력거래게임과 경제급전문제는 문제를 해석하기 위한 목적함수가 다르기 때문에 직접적으로 두 문제를 비교하기에는 무리가 있다. 그러나 발전회사의 측면에서 각 문제가 가져다주는 이익이 어떻게 되는지 비교해볼만하다.

표 3 내쉬균형에 대한 시간대별 시장가격[\$/MW]

Table 3 Market Price at each time for Nash Equilibriums

| Time | 1h | 2h | 3h | 4h | 5h | 6h | 7h | 8h | 9h | 10h | 11h | 12h |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Nash 01 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.71 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 02 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 03 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.71 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 04 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.71 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 05 | 9.33 | 9.44 | 9.64 | 9.70 | 9.67 | 9.73 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 06 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.67 | 9.51 | 9.58 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 07 | 9.64 | 9.67 | 9.79 | 9.70 | 9.67 | 9.73 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 08 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.51 | 9.58 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 09 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 10 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 11 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.71 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 12 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 13 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.70 | 9.67 | 9.73 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 14 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.71 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |
| Nash 15 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 16 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 17 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.51 | 9.58 | 9.73 | 9.79 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 18 | 9.79 | 9.63 | 9.48 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 19 | 9.79 | 9.63 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.48 | 9.73 | 9.70 | 9.79 | 9.67 |
| Nash 20 | 9.33 | 9.44 | 9.79 | 9.67 | 9.63 | 9.71 | 9.71 | 9.79 | 9.42 | 9.67 | 9.79 | 9.63 |

표 4 각 내쉬균형별 발전기 총 이익 [\$ /MW]

Table 4 Profit for each Nash Equilibrium [\$ /MW]

| Nash No. | | 01 | 02 | 03 | 04 | 05 | 06 | 07 | 08 | 09 | 10 |
|----------|-----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Profit | G1 | 2,886 | 3,089 | 2,994 | 3,102 | 3,453 | 3,338 | 3,820 | 3,273 | 2,994 | 2,887 |
| | G2 | 3,884 | 3,472 | 4,027 | 4,170 | 3,257 | 3,470 | 3,370 | 3,322 | 4,040 | 3,897 |
| | Sum | 6,771 | 6,561 | 7,021 | 7,271 | 6,710 | 6,808 | 7,190 | 6,595 | 7,034 | 6,784 |
| Nash No. | | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Profit | G1 | 2,886 | 3,089 | 2,994 | 3,102 | 3,453 | 3,338 | 3,820 | 3,273 | 2,994 | 2,887 |
| | G2 | 3,884 | 3,472 | 4,027 | 4,170 | 3,257 | 3,470 | 3,370 | 3,322 | 4,040 | 3,897 |
| | Sum | 6,771 | 6,561 | 7,021 | 7,271 | 6,710 | 6,808 | 7,190 | 6,595 | 7,034 | 6,784 |

표 5 발전기 증감발률을 고려한 동적부하배분 문제에 대한 결과

Table 5 The results of economic dispatch considering the ramp-rate

| time | 수요 [MW] | 시장가격 [\$ /MWh] | 발전량 [MW] | | Cost [\$ /MW] | | Profit [\$ /MW] | |
|-------|---------|----------------|----------|-------|---------------|----------|-----------------|---------|
| | | | G1 | G2 | G1 | G2 | G1 | G2 |
| 1h | 800 | 9.27 | 433.2 | 366.8 | 3,923.9 | 3,240.6 | 93.1 | 161.0 |
| 2h | 860 | 9.38 | 466.4 | 393.6 | 4,233.8 | 3,490.1 | 139.8 | 200.5 |
| 3h | 900 | 9.45 | 488.6 | 411.4 | 4,442.4 | 3,658.0 | 172.9 | 228.4 |
| 4h | 920 | 9.48 | 499.7 | 420.3 | 4,547.3 | 3,742.5 | 190.0 | 242.8 |
| 5h | 910 | 9.46 | 494.1 | 415.9 | 4,494.8 | 3,700.2 | 181.4 | 235.5 |
| 6h | 830 | 9.33 | 449.8 | 380.2 | 4,078.4 | 3,365.0 | 116.0 | 180.4 |
| 7h | 880 | 9.41 | 477.5 | 402.5 | 4,337.9 | 3,573.9 | 156.1 | 214.3 |
| 8h | 900 | 9.45 | 488.6 | 411.4 | 4,442.4 | 3,658.0 | 172.9 | 228.4 |
| 9h | 880 | 9.41 | 477.5 | 402.5 | 4,337.9 | 3,573.9 | 156.1 | 214.3 |
| 10h | 870 | 9.39 | 472.0 | 398.0 | 4,285.8 | 3,532.0 | 147.9 | 207.4 |
| 11h | 850 | 9.36 | 460.9 | 389.1 | 4,181.9 | 3,448.3 | 131.8 | 193.7 |
| 12h | 860 | 9.38 | 466.4 | 393.6 | 4,233.8 | 3,490.1 | 139.8 | 200.5 |
| Sum | | | | | 51,540.3 | 42,472.6 | 1,797.8 | 2,507.2 |
| Total | | | | | 94,012.9 | | 4,305.1 | |

표 6 동적전력거래게임과 동적부하배분문제의 결과 비교
Table 6 Comparison of the Result between the Game and Dynamic ED

| | 총수입[\$/h] | 총비용[\$/h] | 총이익[\$/h] |
|------------|-----------|-----------|-----------|
| 11th 내쉬균형 | 100,770.5 | 94,206.8 | 6,558.3 |
| Dynamic ED | 98,318.4 | 94,012.9 | 4,305.1 |

표 6과 같이 상기 사례연구의 결과를 바탕으로 전력거래 게임에서 임의로 11번째 내쉬균형점에 대한 비용과 이익을 동적부하배분문제로 해석한 비용과 이익에 대한 결과를 비교하면, 각 발전사업자의 총 비용은 전력거래게임이 경제급 전문제보다 194.00 [\$/hour] 더 크지만 이익면에서는 전력거래게임이 2,253 [\$/h]가 더 발생하였다.

6. 결 론

시장경제의 측면에서 볼 때, 공급자인 기업의 입장에서는 동일한 재화를 생산하는데 있어 비용최소화보다는 이익극대화가 우선적으로 고려된다. 즉, 경쟁시장에서 기업의 비용최소화는 좀 더 많은 이익을 확보하기 위한 이익극대화의 목적함수에 들어가는 하나의 항이 되는 것이다. 본 연구는 경쟁적 전력시장에서 시간대별 발전기 증감발률을 고려한 전력거래 게임을 개별 발전사업자의 입장에서 이익극대화를 위한 게임으로 해석하였다. 시간대별 수요를 만족하는 발전량에 대한 전략으로 각 발전기의 순수전략조합을 구성하고 각 시간사이에 발전기의 증감발률 제약이 고려되었다. 순차적인 내쉬균형점 도출과 열등전략의 제거를 통해 게임의 해인 통합적 내쉬균형점들을 도출하였다. 동적계획법을 사용하여 열등전략들을 제거해가면서 마지막시간대에서 최종적인 내쉬균형점들을 도출하였다.

본 논문에서는 게임의 편의적 해석을 위해 두 개의 발전기 간의 경쟁만을 다루었다. 하지만 실제 전력시장에서는 계통에 전력을 공급하는 다수의 발전회사가 각자 보유하고 있는 각기 다른 유형의 발전기들을 가지고 치열한 경쟁을 할 것이다. 순차적인 방법으로 게임을 해석하는 것이 Brute-force 방법보다는 효율적으로 해를 구할 수는 있지만 다수의 발전사업자가 참여하고 게임이 진행되는 시간대가 길어진다면 여전히 메모리 초과 문제를 완전히 극복하지는 못한다. 따라서 실제 계통에 존재하는 모든 발전기들에 대해 게임을 효율적으로 진행할 수 있는 추가적인 새로운 알고리즘의 적용 및 개발이 더 필요하다.

감사의 글

본 논문은 2010학년도 건국대학교 학술지원에 의하여 연구되었음.(This work was supported by the Konkuk University.)

참 고 문 헌

- [1] D. Fudenberg and J. Tirole, Game Theory, The MIT Press, 1996
- [2] Marn-Geun Park, Bal-Ho Kim, Jong-Bae Park, Man-Ho Jung, "게임이론을 적용한 전력거래 해석", 대한전기학회, 전기학회논문지 A, 제49A권 제6호 2000.6, pp. 266-271
- [3] Jong-Bae Park, Jung-Youl Lim, Ki-Song Lee, Joong-Rin Shin, "도매전력시장에서 N-발전사업자의 보수행렬을 이용한 꾸르노 모델의 내쉬균형점 도출을 위한 방법론", 대한전기학회, 전기학회논문지 A, 제54A권 제2호 2005.2, pp. 97-106
- [4] R. W. Ferrero, S. M. Shahidehpour and V. C. Ramesh, "Transaction Analysis in Deregulated Power Systems using Game Theory.", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 3, Aug. 1997
- [5] J. B. Park, B. H. Kim, J. H. Kim, M. H. Jung, and J. K. Park, "A Continuous Strategy Game for Power Transactions Analysis in Competitive Electricity Markets", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 16, No. 4, Nov. 2001.
- [6] L. B. Cunningham, R. Baldick, and M. L. Baughman, "An Empirical Study of Applied Game Theory : Transmission Constrained Cournot Behavior", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 17, No. 1, pp 166-172, 2002.
- [7] D. Chattopadhyay, "Multicommodity Spatial Cournot Model for Generator Bidding Analysis", IEEE, Trans. on Power Systems, Vol. 19, No. 1, Feb. 2004
- [8] Kwang-Ho Lee, "다자게임에서 발전력제약이 복합전략 내쉬균형에 미치는 영향", 대한전기학회, 전기학회논문지, 제57권 제1호 2008.1, pp. 34~39
- [9] Babayigit. C., Rocha. P., Das. T.K., "A Two-Tier Matrix Game Approach for Obtaining Joint Bidding Strategies in FTR and Energy Markets", IEEE Trans. on Power Systems, VOL. 25, NO. 3, Aug. 2010
- [10] C. Wang and S. M. Shahidehpour, "Optimal generation scheduling with ramping costs", Power Industry Computer Application Conference, pp.11-17, May 1993
- [11] F. N. Lee, L. Lemonidis, and K.-C. Liu, "Price-based ramp-rate model for dynamic dispatch and unit commitment," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 9, No. 3, pp. 1233-1242, Aug. 1994
- [12] M. H. Jung, "Dynamic Game Model for Deregulated Electricity Markets Considering the Ramp Rate Constraints", ISAP International Conference on, Nov.2007
- [13] Allen J.Wood and Bruce F. Wollenberg, Power Generation, Operation, And Control : John Willey & Sons.Inc., 1996.

저 자 소 개



박 용 기 (朴 湧 基)

1979년 11월 14일생. 2005년 건국대 전기공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : 02-458-4778
Fax : 02-444-4179
E-mail : draco98@konkuk.ac.kr



박 종 배 (朴 湧 基)

1963년 11월 24일생. 1987년 서울대 전기공학과 졸업. 1989년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 건국대학교 전기공학과 교수.

Tel : 02-450-3483
Fax : 02-444-1418
E-mail : jbaepark@konkuk.ac.kr



노 재 형 (盧 載 溍)

1969년 11월 10일생. 1993년 서울대 원자핵공학과 졸업. 2002년 홍익대 전기공학과 졸업(석사). 2008년 미국 시카고 Illinois Institute of Technology 전기공학과 졸업(박사). 1992년~2001년 한국전력공사 근무. 2001년~2010년 한국전력거래소 차장. 2010년~현재 건국대학교 전기공학과 조교수.

Tel : 02-450-3934
Fax : 02-444-1418
E-mail : jhroh@konkuk.ac.kr



김 형 중 (金 亨 中)

1969년 7월 7일생. 1996년 인천대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 건국대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1996년 에너지관리공단 입사. 현재 에너지관리공단 수요관리실 공급자수요관리팀 팀장.

Tel : 031-260-4424
Fax : 031-260-4409
E-mail : jakekim@kemco.or.kr



신 중 린 (慎 重 麟)

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

Tel : 02-450-3487
Fax : 02-444-1418
E-mail : jrshin@konkuk.ac.kr