

에너지절약투자사업에 대한 자원조달방식 연구 비대칭정보하에서의 최적계약 도출 -에너지절약시장

글 강광규(한국환경정책·평가연구원)

제2차 석유파동 직후인 1980년대 초 미국에서는 에너지절약투자 자원조달에 대한 새로운 접근방법으로 제3자자원조달(third-party financing)방법이 등장하였는 바, 제3자자원조달이란 다음 세 가지 특징으로 요약될 수 있다. 첫째, 기업 또는 건물주 등 기존 에너지 사용자를 대신하여 자본 및 기술을 확보하고 있는 에너지절약전문 기업이 자신의 자금으로 투자한다(third-party financing). 둘째, 에너지절약전문기업은 새로 투자된 것을 포함한 기존 에너지 사용자의 에너지시설 모두를 자신의 책임하에 보수·관리·운영한다(contract energy management). 셋째, 에너지 절약전문기업의 이와 같은 활동에 대한 보상은 그 결과로 얻게 되는 성과, 즉 에너지 절약액에 비례한다(performance contracting). 즉, 기존 에너지 사용자와 에너지절약전문기업이 에너지 절약을 일정한 비율로 나눠 갖는다.

에너지 시설은 대부분 내구재로서 투자를 위해서는 상당한 자금이 소요되고, 에너지 비용이 총 생산비에서 차지하는 비중이 낮아 비록 투자에 대한 경제성이 확보된다고 할지라도 신제품개발 및 시장지배력 확대 등 전략적 투자에 비해 투자우선순위가 낮은 편이며, 에너지가격 변동이 심해 투자에 대한 위험부담이 크다는 이유로 인해서 에너지 절약투자가 활발하게 이루어지지 않는 것이 일반적이었다. 이와 같은 투자 장애요인을 극복하기 위해 등장한 것이 제3자자원조달 방법인 바, 제3자자원조달 계약하에서 기존 에너지 사용자는 시설투자 및 운영에 대한 여하한 비용지출을 할 필요가 없으며, 단지 에너지절약전문기업에게 새로운 투자 및 에너지시설 관리를 허용함으로써 일정비율의 수익을 보장받게 된다.

에너지 절약산업은 에너지효율 향상 자체 뿐만 아니라 대기질 개선 및 기후변화 대응의 원천적인 방법으로서 1980년대 중반까지는 미국 및 캐나다를 중심으로 급성장하다가, 1980년대 후반에는 유럽

까지 활동영역이 확대되었으며, 1990년대 이후에는 아시아지역에서도 다국적 에너지절약전문기업의 활발한 활동상황이 보고되고 있는 실정이다.

본 연구는 기존 에너지 사용자와 에너지절약전문기업간의 정보가 서로 다른 상황에서 제3자자원조달의 최적계약이 어떻게 체결되는지, 특히 에너지 절약전문기업에 대한 보상은 어떻게 이루어지며, 보상 수준은 어떤 요인에 의해 좌우되는지를 게임이론을 이용하여 살펴 보게 된다. 우선 계약체결·이행 및 보상 등의 전 과정이 2단계게임(principal-agent game, signaling game)¹⁾으로 모델화되며, 전체게임의 단계간 이동에 있어서는 backward induction 원칙이 적용되는 이 유가 설명된다. 다음으로 first-order approach를 이용하여 principal-agent game의 균형을 도출하고, 이를 바탕으로 signaling game의 균형을 도출한다. 특히 forward induction 원칙²⁾을 이용하여 균형(self-enforcing equilibrium)이 유일하게 존재하는 것을 증명하게 된다. 마지막으로 지금까지의 분석결과가 요약되고 결론이 제시된다.

1. 모델

이 게임에는 두 명의 경기자(player), 즉 에너지절약전문기업(energy saving company)과 기존 에너지사용자가 있는 바, 각각 ESCO 및 F라 부르기로 한다. ESCO는 보유하고 있는 에너지 절약 기술수준에 따라 H형과 L형의 두 가지 타입으로만 구분된다고 가정한다. 여기서 H형은 높은 수준의 에너지절약기술을 보유하고 있는 ESCO이며, L형은 낮은 기술수준의 ESCO를 지칭한다. 게임에서 ESCO와 F 모두 에너지시설의 기술적 절약 잠재량에 대해서는 불완전한 정보를 보유하고 있지만, ESCO의 정보가 더 우수하다고 가정한다. ESCO는 H 또는 L 두 가지 형 중의

하나이며, ESCO는 자신이 무슨 형인지 알지만, F는 ESCO가 무슨 형인지 모른다. ESCO가 H형일 확률은 μ 이며, 이 확률은 모든 경기자에게 알려져 있다.³⁾

ESCO의 각 형은 정식계약을 체결하기에 앞서 투자의 타당성을 검토하기 위해 일정수준의 진단료를 받는 대가로 F의 에너지시설에 대해 에너지진단(energy audit)을 실시할 것을 제안한다. 따라서 F가 부담하는 진단료 c 는 ESCO의 전략(strategy)이 되며, c 는 폐쇄구간(bounded interval) $C=[c, \bar{c}]$ 에 속한다. 이 구간에 속하는 각각의 c 에 대해 F는 ESCO의 에너지진단 제안을 받아들이거나(accept; A) 또는 거부하는(reject; R) 두 가지 전략을 가진다. 만약 F가 ESCO의 제안을 거부하면 본 계약 자체도 불가능해지므로 게임은 수익(payload) (0,0)로 끝나게 된다. 반면, F가 ESCO의 제안을 받아들이면, ESCO는 F의 에너지기술자와 함께 에너지진단을 실시하고, 그 결과를 보고서로 작성하여 F에게 제출한다. 에너지진단에 소요되는 ESCO의 비용은 q_i , $i=H, L$ 이다. 여기까지가 첫 번째 단계의 게임, 즉 signaling game이다. 에너지진단의 결과보고서는 에너지절약의 기술적 잠재량에 대한 거의 모든 정보를 담게 된다. 더구나, 에너지진단에는 F의 기술자도 참여하므로, 이 모든 것을 종합하여 진단결과보고서를 검토하게 되면, F는 에너지 절약의 기술적 잠재량에 대해서 ESCO와 거의 동일한 정보를 소유하게 된다. 다시 말해서, 보고서 검토 후에 F는 어떤 타입의 ESCO와 게임을 하고 있는지를 알게 된다.

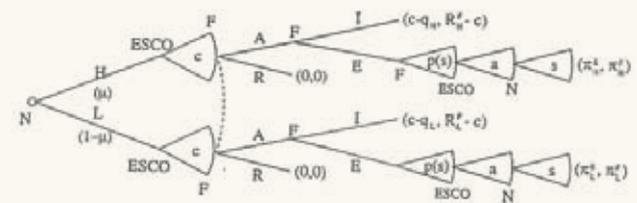
보고서 검토가 끝난 후, 진단료를 지불하게 되면, F는 다음 두 가지 전략 중 하나를 선택하게 된다. ESCO와 본 계약을 체결하거나(E) 아니면 계약체결 대신에 자신의 비용으로 자신이 투자하는 것(I)이다. F가 진단결과로 얻게 되는 정보를 이용하여 직접 투자하는 경우 게임은 여기서 끝난다. 이 경우 i 타입의 ESCO로부터 새로운 정보를 얻고 직접 투자한 경우의 F의 순투자수입을 R_i^F 라고 하자. 그러면, ESCO의 각 타입에 대해서, ESCO의 수입은 $c - q_i$, F의 수입은 $R_i^F - c$ 가 된다.

반면에 F가 ESCO와 본 계약을 체결하기로 한 경우, F는 ESCO에게 $p(s)$ 만큼을 보상해 주겠다고 제안한다. 여기서, s 는 에너지 절약액을 나타내며, 보상함수 $p(s)$ 는 s 의 증가함수인 바, 본 연구

에서는 선형보상함수, 즉, $p(s) = \alpha + \beta s (\alpha \geq 0, 0 \leq \beta \leq 1)$ 만을 고려하기로 한다. 에너지 절약액 s 는 F의 과거 몇년간 에너지비용의 평균치 B 와 ESCO와의 계약하에서 실제로 발생한 에너지비용 t 와의 차이로 계산된다. 즉, $s = B - t$. 만약 t 가 B 보다 커서 s 가 음수가 되면, F는 ESCO에게 아무것도 지불할 필요가 없으며, 이 경우, 실제 에너지 비용 t 를 ESCO가 전액 부담하게 된다. 또한 F는 B 를 초과하여 보상하지 않는다. 따라서 $s \in [0, B]$. 보상함수가 주어지면 ESCO는 그것에 따른 자신의 에너지절약 노력 수준 $a \in A = [a, \bar{a}]$ 를 선택한다. F는 ESCO의 노력수준 a 를 관찰할 수 없으며, 그 결과인 s 만을 관찰할 수 있다고 가정한다. 실제 에너지 절약액이 주어진 s 및 a 에서 발생할 확률은 $\phi(s; a)$ 이며, 이 확률은 경기자 모두에게 알려져 있다. 어떠한 노력 수준하에서도 실제 에너지절약액의 어떤 수준도 도달가능하다는 것을 보장하기 위해 이 확률은 0보다 크고 1보다 작다고 가정한다.

i 형의 ESCO와 계약을 체결했을 경우 F의 수익 π_i^F 는 에너지 절약액에서 타입 i ESCO에 대한 보상금액과 에너지진단비용을 빼준 것과 같다. 즉 $\pi_i^F = s - p(s) - c$.

ESCO는 F로부터의 보상금액에 대하여 누진적인 판매세(sales tax), 즉 $x(p(s))$ 를 납부한다고 가정한다. ESCO의 세후 총수입을 $u(p(s))$ 라고 하면, $u(p(s))$ 는 다음과 같다. 즉, $u(p(s)) = p(s) - x(p(s))$. 그러면 $x(p(s))$ 는 $p(s)$ 에 대하여 볼록(convex)하므로, $u(p(s))$ 는 $p(s)$ 에 대하여 오목(concave)하게 된다. ESCO의 에너지절약시설 투자, 설계, 유지 등을 포함한 본 계약수행에 드는 모든 비용을 $D(a)$ 라고 하자. 비용함수 $D(a)$ 는 a 에 대하여 단조증가, 연속미분 가능, 볼록한 함수이다. 따라서 i 타입 ESCO의 수입 π_i^E 는 다음과 같이 결정된다. 즉, $\pi_i^E = u(p(s)) - D(a) + (c - q_i)$.⁴⁾ 지금까지 설명된 게임을 extensive form으로 나타내면 다음 [그림 1]과 같다.



[그림 1]

언급된 바와 같이, F가 ESCO의 에너지진단 보고서를 검토하게

1) 게임이론에서 일반적으로 사용되는 용어에 대한 번역이 용이치 않을 경우 원어를 그대로 사용함
2) 정의 및 자세한 내용은 Kohlberg 참조
3) 즉, 이 확률은 common knowledge임

되면, F는 어떤 유형의 ESCO와 계약을 체결하게 될 것인지를 알게 된다. 이러한 이유 때문에 그림에서 F가 전략 A를 선택한 후, 처음으로 나타나는 F의 정보집합(information set)은 점선으로 연결되지 않는다. 그 결과 ESCO의 각 유형에 대해서, 그리고 c의 모든 수준에 대해서, ESCO가 진단보고서를 제출한 후, 바로 시작되는 두 번째 단계의 게임, 즉 principal agent game은 부속게임(subgame)이 된다. 따라서 전체게임의 균형을 도출하기 위해서는 backward induction 원칙에 의하여 ESCO의 각 유형에 대해서 c값을 고정시킨 다음 두 번째 단계의 게임에 대한 균형을 구한 후, 그 균형값을 가지고 첫 번째 단계의 게임에 대한 균형을 구하면 된다.

2. 주인-대리인(Principal-Agent) 게임

이 게임에서 F는 주인(principal), ESCO는 대리인(agent)이다. F는 ESCO의 절약 노력수준 a는 관찰할 수 없지만, 노력의 결과인 실제에너지 절약액은 관찰할 수 있다. 이미 널리 알려진 대로 주인-대리인 게임은 대리인인 ESCO에 관한 두 가지 제약 조건하에서 주인인 F의 기대이윤을 극대화시키는 최적보상함수 $p^*(s)$ 및 최적노력수준 a^* 를 찾는 문제로 귀착된다. 두 가지 제약 조건이란 첫째, ESCO로 하여금 계약에 참여할 수 있도록 하기 위해서 적어도 에너지절약시설 투자 및 관리에 대한 기회비용이 ESCO에게 보장되어야 한다(participation constraint; PC)는 것이며, 둘째, F는 자신이 기대하는 만큼의 노력수준을 ESCO가 투입하도록 하기에 충분한 인센티브를 ESCO에게 주어야 한다(incentive compatibility constraint; ICC)는 것이다.

본 연구에서는 ESCO의 투자 및 관리의 기회비용 O에 대해서 편이상 다음과 같이 가정한다.

가정 1 $O_i = 0, i = H, L,$

그러면, 보상함수 $p(s) = \alpha + \beta s$ 하에서 F의 기대이윤 극대화문제는 다음과 같이 정리된다.

4) 계산의 편이상 세금은 ESCO의 이윤이 아닌 보상수입 p(s)에 대해서 부과되는 것으로 함. ESCO에게만 누진세금을 부과시킨 이유는 ESCO를 위험회피자가 되도록 하여 투자관련 위험을 F와 공유토록 하기 위함임. 이미 널리 알려진 바와 같이 ESCO에게 세금이 부과되지 않아 ESCO가 위험중립적이 되는 경우, 투자관련 위험은 위험중립적인 ESCO가 전부 떠맡게 됨. 일반적으로 에너지 절약전문산업은 자본 집약적인 산업인 바, 이와 같이 해서 징수된 세금을 일종의 기금으로 축적해서 에너지 절약전문기업만이 그 기금을 자리로 사용할 수 있도록 용도제한을 두는 것도 좋은 방법이 될 것임.

$$\begin{aligned} & \max_{\alpha, \beta} [(1 - \beta) \int s \theta(s; a) ds - \alpha - c] \\ & \text{s.t. } \int u(\alpha + \beta s) \theta(s; a) ds - D(a) \geq 0 \dots (PC), \\ & \alpha \in \arg \max_{\alpha'} [\int u(\alpha + \beta s) \theta(s; a') ds - D(a') + c - q] \dots (ICC) \end{aligned}$$

(PC)의 경우 최적상태에서 부등호가 등호로 바뀐다(binding)는 것은 쉽게 증명될 수 있다(증명생략).

ESCO의 기대수익을 $E[\pi^E(p(s), a)]$ 라고 하면, (ICC)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E[\pi^E(p(s), a)] \geq E[\pi^E(p(s), a')], \forall a' \in A$$

만약 (ICC)를 만족시키는 노력수준 a가 유일하게 존재한다면, 이러한 노력수준에서 (ICC)를 a로 편미분한 값이 영이 되어야 한다. 즉, $\int p(s) \theta_a(s; a) ds - D'(a) = 0 \dots (ICC^*)$

(ICC)를 (ICC*)로 대체하는 방법을 first-order approach라고 하는 바, 문제는 (ICC)로 문제를 풀었을 때와 (ICC*)로 문제를 풀었을 때의 최적해가 다를 수가 있다는 것이다. Mirrlees[10]에 의해 최초로 이 문제가 지적된 이후 많은 학자들이 이 문제를 해결하기 위해 노력하였는 바, 본 연구에서는 Jewitt의 접근방법을 따라 다음과 같이 가정한다.⁵⁾ 여기서,

$$\phi(s; a) = \int_a^s \theta(\tau; a) d\tau$$

가정 2 (1) $\int_0^t \phi_a(s; a) ds \leq 0, \int_0^t \phi_{aa}(s; a) ds \geq 0 \quad \forall t \in S$

즉, $\int_0^t \phi(s; a) ds$ 는 a에 대해서 증가하지 않으면서 볼록하다(nonincreasing convex).

(2) $\int_0^b s \theta_a(s; a) ds \geq 0, \int_0^b s \theta_{aa}(s; a) ds \leq 0$

즉, $\int_0^b s \theta(s; a) ds$ 는 a에 대해 감소하지 않으면서 오목하다.

(3) $\frac{\theta_a(s; a)}{\theta(s; a)} \geq 0, \forall a \in A$

적분의 성질 integration by part을 이용하면, 가정 2하에서 first-order approach가 유효하다는 것은 어렵지 않게 증명될 수 있다(증명 생략).

(PC)와 (ICC*)에 대한 Lagrangean 승수를 각각 λ, η 라고 하자. 그러면 F의 기대이윤 극대화 문제로부터 Lagrangean 방정식을 만들게 되고, 이 방정식을 5개의 미지수 $\alpha, \beta, \lambda, \eta$ 에 대해서 각각 미분하면, 5개의 방정식을 구하게 된다. F의 기대이윤 극대화문제를 주목해 보면, 목적함수는 α, β, a 에 대해서 오목하고, (PC)의 양변에 -1을 곱하면, 왼쪽의 항 전체는 볼록하게 된다는 것을 알 수 있다. 따라서, Kuhn-Tucker의 Sufficiency

Theorem에 의하여 5개 미지수의 최적값이 유일하게 결정된다. 각 미지수의 최적값을 *를 덧붙혀 표시하기로 하자. 만약 F가 i 타입의 ESCO와 계약을 체결했을 경우, 최적상태에서 F의 기대이윤 $E[\pi F_i^*]$ 와 i타입 ESCO의 수익 $E[\pi_i^*]$ 는 각각 다음과 같다. 여기서, $i = H, L$.

$$E[\pi F_i^*] = \int (s - p_i^*(s)) \theta(s; a^*) ds - c,$$

$$E[\pi_i^*] = c - qi.$$

L 타입보다는 H타입의 ESCO가 에너지 절약기술이 더 우수하므로, 에너지 진단비용이 H타입의 경우 더 적게 소요된다고 가정한다.

가정 3 $qH > qL$

그 결과, 최적상태에서 H타입은 L타입보다 더 많은 수익을 올리게 된다. 동일한 이유로 인해서 L타입보다는 H타입과 계약하는 것이 F에게 더 유리하다고 가정한다. 수식을 간단히 하기 위해서 $\int (s - p_i^*(s)) \theta(s; a^*) ds$ 를 E^i , $i = H, L$ 이라고 하자.

가정 4 $E[\pi_H^*] > E[\pi_L^*] \Rightarrow EH^* > EL^*$.

3. 신호발생(Signaling) 게임

앞에서 언급한 바와 같이 backward induction에 의하여 단계간 게임을 분석하게 되므로, 주인-대리인 게임으로부터 각 경기자의 수익이 결정되면 직전의 경기자인 F의 각각의 전략에 대한 수익을 비교하여 F가 어떤 전략을 선택할 것인지를 결정해야 한다. 여기서 F는 ESCO와 계약을 체결하든지 아니면 자신이 직접 투자하든지의 두 가지 전략을 갖는다. ESCO와 계약을 체결했을 경우 F의 수익은 지금까지 설명한 바와 같다.

ESCO와 계약을 체결하지 않을 경우, F는 에너지 진단을 통해 얻게 된 에너지 절약기술에 대한 새로운 정보를 가지고 자신이 직접 투자하게 된다. 그 정보가 i형의 ESCO로부터 얻게 된 경우, F의 절약투자에 대한 순 이윤을 R_i^F , $i = H, L$ 라고 하자. L형보다는 H형의 ESCO가 더 가치있는 정보를 생산해 낸다고 가정했으므로, L형보다는 H형의 정보를 이용하여 투자하는 것이 F에게는 더 유리하다고 가정한다.

가정 5 $R_H^F > R_L^F$.

F가 직접 투자하는 경우에도 진단료는 지불해야 하므로, 이 경우에 있어서 F의 수익은 $R_i^F - c$, $i = H, L$ 이 된다.

반면, F가 i형의 ESCO와 계약을 체결했을 경우, 최적상태에서 F의 수익은 $E_i^* - c$, $i = H, L$ 이므로 다음과 같은 4가지 경우가 발생가능하다. 여기서 계약을 체결했을 경우와 직접 투자했을 경우의 F의 수익이 동일하다면, F는 직접 투자하는 쪽을 택한다고 가정한다.

1) $R_H^F < EH^*$, $R_L^F \geq EL^*$. 즉, F가 H형의 ESCO하고만 계약을 체결하는 경우

2) $R_H^F < EH^*$, $R_L^F < EL^*$. 즉, F가 어떤 유형의 ESCO와도 계약을 체결하는 경우

3) $R_H^F \geq EH^*$, $R_L^F \geq EL^*$. 즉, F가 어떤 유형의 ESCO와도 계약을 체결하지 않는 경우

4) $R_H^F \geq EH^*$, $R_L^F < EL^*$. 즉, F가 L형의 ESCO하고만 계약을 체결하는 경우

위 4가지 모두 경우에 있어서 균형을 도출하기까지의 과정이 각각의 경우에 따라 약간씩의 차이는 있지만, 최종 균형의 내용은 동일하다. 따라서, 본 연구에서는 signaling 게임의 전형적인 경우인 첫 번째 경우만을 자세히 분석하기로 한다. 분석에 있어서는 ESCO의 각 타입이 독립된 경기자가 되는 Harsanyi[5]의 접근방법을 택하게 된다.

정의 만약 $\sigma^* = (c^*_H, c^*_L, d_F(c, \bar{c}))$, 여기서

$$d_F(c, \bar{c}) = \begin{cases} A & c \leq \bar{c} \\ R & c > \bar{c} \end{cases}$$

이면, σ^* 를 이 게임의 Bayesian 균형이라 한다. 만약 $c^*_H \neq c^*_L$ 이면, σ^* 를 분리균형(separating equilibrium), $c^*_H = c^*_L$ 이면, σ^* 를 공동균형(pooling equilibrium)이라 한다.⁶⁾

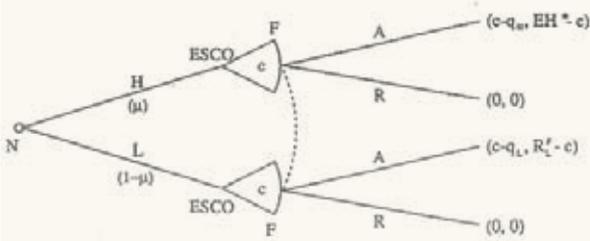
여기서, \bar{c} 는 F로 하여금 \bar{c} 와 같거나 더 낮은 수준의 c 를 관찰한 경우 ESCO의 에너지진단 제안을 받아들일도록 하고, 그렇지 않는 경우 제안을 거절하도록 하게 해 주는 전략매개변수(parametric strategy)이다.

이러한 정의하에서 첫 번째 경우, 즉 $R_L^F < EH^*$, $R_L^F \geq EL^*$ 의 경우를 분석해 보자. 가정 5에 의하여 $R_L^F < R_H^F$ 이므로, 다음 관계가 성립한다. $EL^* \leq R_L^F < R_H^F < EH^*$

ESCO가 H형이면, F는 두 번째 단계 게임에서 H형과 본계약을

5) Jewitt는 first-order approach를 만족시키기 위한 조건으로 47지를 거론했는 바, 본 논문에서와 같이 보상함수가 선형인 경우, Jewitt의 마지막 조건은 필요치 않아 여기서는 제시하지 않음

체결할 것이다. 따라서 첫 번째 단계 게임에서 F가 H형의 에너지진단 제안을 받아들이면, H형의 수익은 $c - q_H$, F의 수익은 $EH^* - c$ 가 된다. ESCO가 L형이면, F는 L타입과 본 계약을 체결하지 않는다. 그러나, 첫 번째 단계 게임에서 F가 L형의 에너지진단 제안을 받아들이면, L형의 수익은 $c - q_L$, F의 수익은 $R^F_L - c$ 가 된다. 반면, F가 첫 번째 단계에서 ESCO의 진단제안을 거절하면, 이 게임은 ESCO의 유형에 관계없이 수익(0, 0)으로 끝난다. 이 게임을 extensive form으로 나타내면 다음 [그림 2]와 같다.



[그림 2]

1. 분리균형(Separating Equilibrium)

정의에서 밝힌 바대로 어떠한 분리균형점에서도 c^*_H 와 c^*_L 는 일치하지 않는다. 따라서 분리균형에서 F가 어떤 c 를 관찰하게 되면, 그는 그 c 가 어떤 유형의 ESCO로부터 제안된 것인지를 식별할 수 있다.

각 타입의 ESCO는 균형에서의 자신의 수익을 영보다 작게 만드는 c 를 선택하지는 않을 것이다. 균형에서 i 형의 수익은 $c^*_i - q_i$, $i = H, L$ 이고, 이들은 음수가 될 수 없으므로, $c^*_i \geq q_i$ 의 조건을 얻게 된다.

균형에서의 i 형 ESCO의 수익을 영으로 만드는 c_i 를 \hat{c}_i 로 나타낸다. 따라서 $\hat{c}_H = q_H$, $\hat{c}_L = q_L$ 이 되고, $c^*_H \geq \hat{c}_H$, $c^*_L \geq \hat{c}_L$, 그러면 $q_L > q_H$ 이므로, $\hat{c}_L > \hat{c}_H$ 가 된다.

Claim 1 어떠한 분리균형에서도 $c^*_H = \bar{c} < c^*_L$ 가 성립한다.

Proof $\bar{c} < \hat{c}_H$ 라고 가정하자. 그러면 F는 ESCO의 에너지진단 제안을 거절할 것이다. 그러나, $c^*_H \geq \hat{c}_H$ 이므로 다음 두 가지 경우에 있어서 어떠한 모순도 발생하지 않는지 살펴 보아야 한다:

(i) $\bar{c} < \hat{c}_H$ (ii) $\bar{c} \geq \hat{c}_H$.

(i) $\bar{c} < \hat{c}_H$ 라고 하자. 만약 F가 더 높은 \bar{c} , 예를 들어, \hat{c}_H 과 같게 되는 수준의 \bar{c} 으로 이탈(deviate)하게 되면, F는 양의 수익을 얻게

되므로 이탈할 것이다. 따라서 이것은 균형의 정의에 모순된다.

$$E[\pi^*_H] = EH^* - \hat{c}_H = EH^* - q_H > 0.$$

(ii) $\bar{c} \geq \hat{c}_H$ 라고 하자. 그러면 H형은 양의 수익을 얻기 위해서 $\hat{c}_H \leq c^*_H \leq \bar{c}$ 가 되는 더 낮은 c 로 이탈할 것이다. 따라서 이것은 균형의 정의에 모순된다.

$\bar{c} > c^*_H$ 라고 가정하자. $\bar{c} > c' > c^*_H$ 라고 하자. F는 c^*_H 와 c' 어느 경우에도 진단제안을 받아들일 것이다. 그러면, H형은 자신의 수익을 증가시키기 위해서 c' 으로 이탈하게 된다. 이것은 모순이다.

$c^*_L < \bar{c}$ 라고 가정하자. $c^*_L < c' < \bar{c}$ 라고 하자. F는 c^*_L 와 c' 어느 경우에도 진단제안을 받아들일 것이다. 그러면, L형은 더 많은 수익을 얻기 위해서 c' 로 이탈할 것이므로 이것은 모순이다.

$c^*_L = \bar{c}$ 라고 가정하자. $c^*_H = \bar{c}$ 이므로 이것은 분리균형의 정의에 모순된다.

따라서, 어떠한 분리균형에서도 F는 H형의 진단제안은 받아들이고, L형의 제안은 거절하게 된다.

Claim 2 $c^*_H = \hat{c}_L$

Proof $c^*_H < \hat{c}_L$ 라고 가정하자. $c^*_H < c' < \hat{c}_L$ 라고 하자. 그러면, $c^*_H = \bar{c}$ 이므로 F는 c^*_H 를 받아들인다. 이때 H형은 더 많은 수익을 얻기 위해서 c' 로 이탈하려고 할지 모른다. 그러나, F는 $\bar{c} < c'$ 이므로 c' 를 받아들이지 않는다. 그러나, 만약 F가 c' 과 일치하는 수준으로 \bar{c} 를 높여서 c' 을 받아들여도 양의 수익을 얻을 수 있으므로, F는 이탈할 것이다. 이것은 균형의 정의에 모순된다.

$$E[\pi^*_H] = EH^* - c' > EH^* - c_L > EH^* - q_L > EL^* - q_L > 0.$$

$c^*_H > \hat{c}_L$ 이라고 가정하자. F는 c^*_H 를 받아들일 것이다. 그러면, L형은 더 많은 수익을 얻기 위해서 c^*_H 로 이탈한다. 이것은 분리균형의 정의에 모순된다.

Claim 2에 의하여 H 타입의 분리균형전략은 \hat{c}_L 로 유일하다.

Claim 3 $c^*_L \geq R^F_L$.

Proof $c^*_L < R^F_L$ 라고 가정하자. Claim 1에 의해서 $\bar{c} < c^*_L$ 이므로 F는 L타입의 진단제안을 거절할 것이다. 그러나, F가 c^*_L 를 받아들이면 양의 이윤을 얻을 수 있다.

$$E[\pi^*_L] | c^*_L = R^F_L - c^*_L > R^F_L - R^F_L = 0.$$

따라서, F는 R^F_L 방향의 더 높은 \bar{c} 로 이탈하게 되므로 모순이다.

6) 더 형식적이고 자세한 정의는 Fudenberg and Tirole 참조

Claim 3에 의하여 R_L^F 보다 크거나 같은 어떠한 c_L^* 도 L타입의 분리균형전략이 된다.

Proposition 1 $(c_H^*, c_L^*, d_F(c, \bar{c}))$ 는 분리균형이다. \Leftrightarrow Claim 1, 2, 3가 성립한다.

Proof (생략)

H형의 분리균형 전략은 유일하지만 L형의 분리균형 전략은 무수히 많기 때문에 결국 무수히 많은 분리균형을 갖게 된다. 따라서, forward induction 원칙을 이용하여 L타입의 분리균형전략이 유일하게 정리되면, 분리균형도 유일하게 도출된다.

어떠한 이유로 인해서 F가 ESCO의 유형을 식별할 수 없게 되었다고 해 보자. 그러면, F는 에너지진단 허용에 따른 자신의 기대이윤 $\mu(EH^* - c) + (1 - \mu)(R_L^F - c)$ 이 영 이상일 경우에만 ESCO의 진단제안을 허용할 것이다. 이로부터 F의 기대이윤을 영으로 만드는 c 의 최저수준은 다음과 같이 계산된다. $\hat{c} = \mu EH^* + (1 - \mu)R_L^F$.

Proposition 2 \hat{c} 가 forward induction 원칙을 만족시키는 L형의 유일한 분리균형 전략이다.

Proof F는 어떠한 분리균형에서도 ESCO의 유형을 식별할 수 있으며, $\bar{c} < c_L^*$ 이기 때문에, F는 R_L^F 보다 크거나 같은 어떠한 c_L^* 에 대해서도 ESCO의 제안을 거절한다. 따라서 분리균형 결과를 초래하는 모든 균형에 있어서 R_L^F 보다 크거나 같은 어떠한 c 도 H형에게는 열등한 전략(inferior strategy)이 된다.

H형의 원래 전략집합에서 R_L^F 보다 크거나 같은 모든 c 를 제외시킨 새로운 게임을 고려해 보자. 이러한 새로운 게임에서 만약 F가 R_L^F 보다 크거나 같은 어떤 c 를 관찰하면, F는 그것이 확실하게 L형의 전략이라는 것을 인식하게 된다. 따라서 F는 이러한 진단제안을 거절하게 되며 L형의 R_L^F 보다 크거나 같은 어떠한 전략을 선택해도 자신의 수익은 영이 되므로 상관없다.

그러나, L형은 F로 하여금 자신의 제안을 받아들일도록 자신이 H형인 것처럼 가장하고 싶어한다. 이 경우 F가 어떤 c 를 관찰한다 할지라도 F는 그것이 어떤 유형의 ESCO로부터 나온 것인지 식별하지 못한다. 따라서, F는 기대이윤의 크기에 의존해서 자신의 의사결정을 내리게 된다. 더 자세히 이야기하면, F는 제안을 받아들임으로써 얻게 되는 자신의 기대이윤이 영보다 작으면, 진단제안을 거절할 것이다.

$$\mu(EH^* - c_L^*) + (1 - \mu)(R_L^F - c_L^*) < 0 \Rightarrow c_L^* > \hat{c}.$$

즉, $c_L^* > \hat{c}$ 이면, F는 어떤 경우에도 진단제안을 거절한다.

$c_L^* < \hat{c}$ 라고 가정하자. $c_L^* < c' < \hat{c}$ 라고 하자. L형은 F가 \hat{c} 까지는 진단제안을 받아들여라 기대하고, 자신의 수익은 c 에 따라 증가하기 때문에 c' 으로 이탈하게 된다. 이것은 균형의 정의에 모순된다.

이 Proposition에 의하여 forward induction 원칙을 만족시키는 분리균형은 다음과 같이 유일하게 결정된다.

$$\sigma^* = (c_H^*, c_L^*, d_F(c, \bar{c})), c_H^* = \hat{c}, c_L^* = \hat{c},$$

$$d_F(c, \bar{c}) = \begin{cases} A & c = c_H^* \\ R & c = c_L^* \end{cases}$$

이 유일한 분리균형에서의 H형은 수익은 $q_L - q_H$, L형의 수익은 0, F의 수익은 $EH^* - q_L$ 이다.

2. 진단제안 허용시의 공동균형(Pooling Equilibrium)

공동균형에서는 $c_H^* = c_L^*$ 이므로, F가 어떤 c 를 관찰한다고 할지라도, F는 그것이 어떤 유형의 ESCO로부터 제안된 것인지를 식별할 수 없게 된다. 공동균형에서의 H형 또는 L형의 균형전략을 c^* 라고 하자. 즉 $c^* = c_H^* = c_L^*$. F가 ESCO의 진단제안을 거절했을 경우 나타나게 되는 어떠한 공동균형도 논의에서 제외하기로 한다. F가 진단제안을 거절하면, 공동균형의 경우 게임은 수익 (0, 0)으로 끝나게 되어, 본 계약과 관련하여 별 관심있는 결과를 가져 오지 않기 때문이다.

Claim 4 $c^* \leq \hat{c}$.

Proof 공동균형 중에서 F가 ESCO의 진단제안을 받아들이는 경우만을 고려하고 있으므로, 어떠한 공동균형에서도 F의 기대이윤은 최소한 영이 되어야 한다. 즉, $\mu(EH^* - c^*) + (1 - \mu)(R_L^F - c^*) \geq 0$. 이 부등식을 c^* 에 관하여 풀면, $c^* \leq \hat{c}$ 를 얻게 된다. F가 ESCO의 유형을 모르는 상태에서 ESCO의 진단제안을 받아들일 경우 F의 기대이윤을 영으로 만드는 진단료가 \hat{c} 이다. 따라서, ESCO의 유형을 모르는 상태에서 \hat{c} 보다 더 높은 수준의 진단료가 제안될 경우, F는 어떤 경우에도 진단제안을 거절할 것이다. C^* 를 \hat{c}_L 과 사이의 모든 c 의 집합으로 표시하기로 하자. 즉, $C^* = \{c \mid \hat{c}_L \leq c \leq \hat{c}\}$.

Claim 5 C^* 는 공집합이 아니다(nonempty).

Proof $\hat{c} = \mu EH^* + (1-\mu)R_L^F$ 이고, $E_H^* > E_L^* > q_L = \hat{c}_L$, $R_L^F \geq EL^*$, $q_L = \hat{c}_L$ 이므로, $\hat{c} > \mu\hat{c}_L + (1-\mu)\hat{c}_L = \hat{c}_L > 0$.

Claim 6 $c^* = \hat{c}$.

Proof F가 ESCO의 진단제안을 받아들이므로, $c^* \leq \bar{c}$, $c^* < \bar{c}$ 라고 가정하자. $c^* < \bar{c} < \bar{c}$ 라고 해 보자. F는 c^* 에서도 ESCO의 진단제안을 받아들인다. 그러면, ESCO의 두 유형 모두 그들의 수익을 증대시키기 위해 c^* 으로 이탈하므로, 모순이다.

Proposition 3 $\sigma^* = (c^*, c^*, d_F(c, \bar{c}))$ 는 공동균형이다. $\Leftrightarrow c^* \in C^*$.

Proof σ^* 가 공동균형이라고 해보자. 그러면 Claim 4에 의해 $c^* \leq \bar{c}$, $c^* < \hat{c}_L$ 이라고 해 보자. 그러면 L형의 이윤은 음수가 되므로 L타입은 L보다 낮은 수준의 c 를 선택하지 않을 것이다. 따라서, $c^* \geq \hat{c}_L$.

$c^* \in C^*$ 라고 해 보자. C^* 로부터 어떠한 c , 예를 들어 c' 을 골라 그것을 고정시킨다. c' 이 C^* 에 속하기 때문에 c' 에서 F의 기대이윤은 적어도 영이다. 따라서 c' 에서 F는 진단제안을 받아들이므로, $c' \leq \bar{c}$, $c' < \bar{c}$ 라고 가정해 보자. $c' < \bar{c} < \bar{c}$ 라고 해 보자. F는 c' 에서도 진단제안을 받아들일 것이다. 그러면, ESCO의 두 유형 모두 그들의 수익증대를 위해 c' 로 이탈하게 되므로 모순이다. 따라서, 공동균형에서는 $c' = \bar{c}$ 이어야 한다. 그러므로, $\sigma^* = (c^*, c^*, d_F(c, \bar{c}))$ 는 공동균형이다.

이러한 증명은 C^* 에 속하는 어떠한 c 에 대해서도 성립한다.

Claim 5에서 증명한 바와 같이 $\hat{c}_L < \hat{c}$ 이므로 이 게임에서는 다수의 공동균형이 존재하게 되며, 분리균형의 경우에서처럼 forward induction 원칙을 이용하여 유일한 공동균형을 도출하게 된다.

Proposition 4 $(\hat{c}, \hat{c}, d_F(c, \bar{c}))$, $d_F(c, \bar{c}) = \begin{cases} A & c = \hat{c} \\ R & c \neq \hat{c} \end{cases}$ 가 forward induction 원칙을 만족시키는 유일한 공동균형이다.

Proof c^* 가 각 타입 ESCO의 공동균형전략이라고 하자. 여기서 $\hat{c}_L \leq c^* < \hat{c}$, $c^* < \bar{c} < \bar{c}$ 라고 하자. $c^* = \bar{c}$ 이므로, c^* 가 공동균형 전략이 되기 위해서 F는 c^* 에서 진단제안을 받아들이고 c^* 에서는 거절해야 한다. 그러면 $c^* \geq \hat{c}_L$ 이기 때문에 L형의 수익은 c^* 에서는 영이지만, c^* 에서는 최소한 영이다. 따라서, 공동균형 결과를 가져다 주는 모든 공동균형에 있어서 c^* 은 L형에게 열등전략이 된다. L형의 전략집합에서 c^* 을 제외한 새로운 게임을 고려해 보자. 이 새로운 게임에서 만약 F가 c^* 을 관찰하면, F는 그 c^* 이 H형으

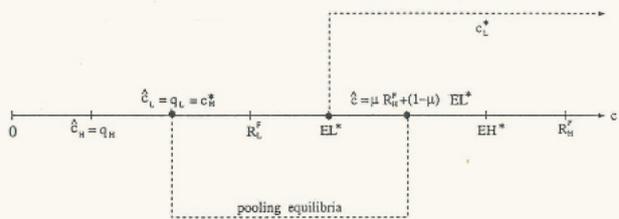
로부터 나왔다는 것을 확신하게 된다. 따라서, F가 c^* 에서 진단제안을 허용하면, F의 수익은 양의 값을 가진다. 즉,

$$EH^* - c^* > EH^* - \hat{c} = EH^* - \mu EH^* - (1-\mu)R_L^F \\ = (1-\mu)(EH^* - R_L^F) > 0.$$

따라서, F는 c^* 에서 진단제안을 받아들인다. 그러면 H형은 자신의 수익증대를 위해서 c^* 로 이탈하게 되므로 이것은 균형의 정의에 모순된다. 이 유일한 공동균형에서 H형의 수익은 $\hat{c} - q_H$, L형의 수익은 $\hat{c} - q_L$, F의 수익은 영이 된다. H형은 유일한 분리균형에서 보다는 유일한 공동균형에서 더 많은 수익을 얻게 되는 바, 유일한 분리균형에서의 H형의 수익은 $q_L - q_H$ 이고, \hat{c} 가 q_L 보다 크기 때문이다. 유일한 분리균형에서 L형의 수익은 영이었지만, 유일한 공동균형에서 L형의 수익은 $\hat{c} - q_L$ 로 양수이기 때문에, L형은 유일한 공동균형에서가 더 유리하다. 반면, F는 유일한 공동균형에서가 유일한 분리균형에서 보다 더 불리하다.

3. Self-Enforcing Equilibrium

지금까지 본 바와 같이 이 게임에서 forward induction 원칙을 만족시키는 균형은 분리균형과 공동균형 각각 하나씩 두 개가 되며, 그것을 도시하면 [그림 3]과 같다.



[그림 3]

다시 forward induction 원칙을 이용하여 두 개의 균형 중 어느 것이 안정적(self-enforcing)인지 살펴보기로 한다. 다수의 분리균형과 다수의 공동균형으로부터 유일한 분리균형과 유일한 공동균형을 도출하는 과정에서 이미 forward induction 원칙을 사용했으므로, self-enforcing 균형을 도출하기 위해 이미 제거된 분리균형 및 공동균형을 더 이상 고려할 필요는 없다. forward induction 원칙을 만족시키는 두 개의 균형만을 고려하는 것으로 충분하다.

Proposition 5 이 게임의 self-enforcing 균형은 forward induction 원칙을 만족시키는 분리균형이 되며, 그것은 유일하다.

Proof F는 유일한 공동균형에서 아무것도 얻지 못하지만, 유일

한 분리균형에서는 양의 수익을 얻는다. 따라서 F에게 있어서 유일한 공동균형을 초래하는 전략은 유일한 분리균형을 초래하는 전략에 비해 열등하다. F의 전략집합으로부터 유일한 공동균형을 초래하는 전략을 제외시킨 새로운 게임을 고려해 보자. 이 새로운 게임에서 만약 H타입이 \hat{c} 을 고수하면, \hat{c} 에서는 아무런 계약도 이루어지지 않으므로 H형은 아무것도 얻지 못한다. 반면, H형이 \hat{c}_L 을 선택하면 양의 수익, 즉 $q_L - q_H$ 를 얻게 된다. 따라서, H형은 \hat{c} 보다는 \hat{c}_L 을 선택하게 된다. L타입이 자신에게 영의 수익을 가져다 주는 \hat{c}_L 로 이탈한다고 해 보자. 그러면, $\hat{c}_H^* = \hat{c}_L^* = \hat{c}_L$ 인 상태에서 공동균형을 얻게 된다. 그러나 Proposition 4에 의하면, 이것은 forward induction 원칙을 만족시키지 못한다. 따라서 L형의 self-enforcing 균형 전략은 가 된다. 결국 F가 \hat{c}_L 에서 H형의 진단제안을 받아들이고 \hat{c} 에서 L형의 제안을 거절하는 것, 이것이 이 게임의 유일한 self-enforcing 균형이다. 이것은 forward induction 원칙을 만족시키는 유일한 분리균형이며, 여기서 H형의 수익은 $q_L - q_H$, F의 수익은 $EH^* - q_L$, 그리고 L형의 수익은 영이다. 이 self-enforcing 균형에서 H형은 자신과 L형을 구별짓기 위해서 $\hat{c}_L = q_L$ 을 선택하는 바, 그것은 \hat{c}_L 에서 H형은 양의 수익을 얻지만, L형은 양의 수익을 얻을 수 없기 때문이다. 반면, L형은 F의 기대이윤을 영으로 만드는, \hat{c} , 즉 \hat{c} 를 self-enforcing 균형 전략으로 선택하게 된다.

4. 맺는말

본 연구는 기존 에너지사용자와 에너지절약 전문기업간의 정보가 비대칭적일 경우, 특히 에너지절약전문기업의 에너지절약기술에 대한 정보가 기존 에너지 사용자보다 더 우수한 경우, 두 당사자간의 제3자재원조달에 관한 최적계약이 어떻게 체결되고 그 결과로 나타나는 각자의 수익이 어떻게 결정되는지를 두 단계 게임의 모델을 통해 분석하였다. 에너지절약전문기업은 자신의 에너지절약기술수준에 따라 두가지 타입, 즉 기술수준이 우수한 타입과 기술수준이 열악한 타입만이 존재한다고 가정하였으며, 이러한 가정하에서 도출된 최종결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 전체 게임에서 안정적인(self-enforcing) 균형은 유일하게 존재하는 바, 그것은 기존 에너지 사용자는 기술수준이 우수한 에너지절약전문기업과 에너지진단 및 제3자재원조달계약을 체결할 뿐, 기술

수준이 열악한 에너지절약전문기업과는 어떠한 거래도 하지 않는다는 것이다. 기술수준이 우수한 기업은 자신을 기술수준이 열악한 기업과 구별짓기 위해서, 기술수준이 열악한 기업이 에너지진단을 통해서 정확하게 영의 수익을 얻을 수 있는 수준의 진단료를 기존에너지 사용자에게 제시하여 기존 에너지 사용자와 에너지 진단 및 본 계약을 체결하고 양의 수익을 얻게 된다. 기존 에너지 사용자는 에너지절약시설 투자 및 관리에 대한 어떠한 비용도 부담하지 않고, 단지 에너지절약전문기업으로 하여금 자신의 에너지시설에 대한 신규투자 및 관리를 대행케 하는 대가로 양의 수익을 얻게 된다. 둘째, 안정적 균형에서 기술수준이 우수한 절약전문기업의 수익은 기술수준이 열악한 전문기업의 에너지진단비용과 자신의 진단비용의 차이로 나타난다. 따라서 두 타입간의 진단비용의 차이가 크면 클수록 기술수준이 우수한 전문기업의 수익은 커지게 된다. 에너지절약기술 수준이 에너지 진단비용의 수준과 직결된다고 하면, 이는 두 타입간의 기술수준의 격차가 크면 클수록 기술수준이 우수한 타입의 수익이 커진다는 것을 의미한다. 따라서 에너지절약전문기업은 자신의 이윤을 증대시키기 위해서는 에너지절약기술 개발에 최선을 다하지 않을 수 없다. 우리나라에 있어서도 미국의 경험이 시사하는 바와 같이 건물부문을 중심으로 제3자재원조달계약을 적극 활용하면 에너지절약 산업 발전뿐만 아니라 에너지절약 투자 증대 및 절약기술 발전에도 상당한 기여를 하리라고 본다. 대기오염물질 및 온실가스의 대부분이 화석연료 소비로부터 배출됨을 감안해 보면, 에너지절약산업 발전을 통해 에너지효율이 향상되면 화석연료 투입량 자체가 감소되기 때문에 대기오염물질 및 온실가스 배출량이 원천적으로 감소될 수 있다. 에너지절약산업이 대기질 개선 및 온난화 방지에 상당히 기여할 수 있는 것이다. 제3자재원조달계약은 에너지 절약산업 뿐만 아니라 환경산업에도 적용될 수 있다. 기존 오염물질 배출업자와 환경투자전문기업간에 계약이행에 따른 성과를 무엇으로 정의할 것인가에 대한 합의만 이루어지면 두 당사자간에 제3자재원조달계약이 체결될 수 있다. 본 연구에서는 분석의 편의상 에너지절약전문기업의 제3자재원조달계약 이행에 대한 기대비용이 영이라고 가정하였으나, 기회비용이 어떤 양의 값을 가진 경우 분석결과가 어떻게 달라지는지를 보는 것도 흥미로운 것이다. 또한 본 연구에서는 실제 에너지절약시장에서 행해지는 대로 선형보상함수만을 고려하였으나 일반보상함수를 이용하여 분석결과를 일반화시키는 것도 중요하리라고 본다.