

知識 및 네트워크 外部性이 있는 技術革新게임의 개방루프戰略의 進化⁽¹⁾

宋 旻 模

진화게임의 관점에서 기업이 혁신과 모방이라는 두 가지 전략을 수행할 수 있고 모든 전략이 개방루프전략의 형태를 띠는 때 생산기술의 지식외부성이 존재한다 해도 기업의 혁신유인은 완전히 소멸되지 않는다. 그리고 네트워크 외부성이 개입된 상황을 유전알고리즘 시뮬레이션으로 분석해 본 결과, 소비자들이 재화에 대한 가치평가를 내릴 때 그 재화의 소비에서 오는 네트워크 외부성에 높은 비중을 부여할수록 기업의 혁신경쟁은 가속화된다.

1. 序 論

본 연구는 소비자 네트워크 외부성과 기업간 지식외부성이라는 두 가지 형태의 외부성이 존재할 때 기업의 혁신 및 비혁신 전략의 진화를 다룬다. 소비자가 어떤 재화를 선택할 때 해당 재화가 주는 고유의 가치 이외에 그 재화를 시장내의 여타의 소비자들 얼마나 많이 소비하고 있는가, 그리고 그 재화의 보완재들 역시 여타의 소비자들 얼마나 많이 소비하고 있는가가 그 재화의 소비에서 오는 효용에 영향을 미칠 때 소비의 '네트워크 외부성'이 존재한다고 말한다.

이하 네트워크 외부성이라고 할 때 모두 이 소비의 네트워크 외부성을 지칭하는 것으로 한다.

기업이 일정한 비용을 들여서 수행한 기술혁신의 결과로 창출된 지식의 일부 또는 전부가 아무런 댓가 없이 다른 기업의 생산요소로 흡수될 때 생산의 '知識外部性'이 존재한다고 말한다. 이하 지식외부성이라고 할 때에도 역시 이 생산의 지식외부성을 지칭하는 것으로 한다.

기업이 생산행위에 투여하는 생산요소로서의 지식은 자체적으로 개발해낸 것 이외에도 지식의 공공재적 특성에 편승하여 특별한 가격을 지불하지 않고 외부로부터 획득하는 경우도 있다. 여기에서 외부성의 사회적 비효율성이 등장하면서 기업으로부터 혁신의 유인

(1) 이 논문은 필자의 박사학위논문의 일부를 수정보완한 것이다.

을 알아가는 것으로 알려져 있다.

그리고 어떤 기업의 제품이 소비자에게 선택되는 중요한 기준중의 하나로서 소비의 네트워크 외부성이 존재할 때, 기업은 기술혁신에 기울인 자신의 노력과는 직접적인 상관없이 그 재화의 판매에 영향을 받게 된다. 왜냐하면 네트워크 외부성은 여타 보완재 및 경쟁재들의 기술혁신상황과 그를 통한 소비자들의 관련제품군 선택상황에 따라 달라지기 때문이다. 그런 의미에서 소비의 네트워크 외부성이 존재할 때 기업에 귀속되는 보수는 기업의 의사결정권 외부에서 결정되는 것이라고 할 수 있다.

이러한 두 가지 종류의 외부성이 존재할 때 기업의 혁신의사결정이 영향을 받을 것은 당연하다. 본 연구는 이러한 문제의식에서 출발한다. 기업은 현재의 시장상황, 지식외부성의 정도, 그리고 과거 자신을 포함한 여타기업들의 행동 등을 종합적으로 고려하여 금기의 혁신의사결정을 내리게 된다. 이때 기업은 어떤 형태의 의사결정을 내리게 될 것인가?

이 문제를 본 연구에서는 생물학적 맥락의 최적화 개념을 응용하여 분석해보고자 한다. 경기자들은 항상 자신의 내재된 행동규범만을 따르되, 매기마다 집단이 구현한 성적표를 관찰하고 자신의 전략을 보다 나은 방향으로 수정해 나가는, 제한적 합리성을 보유한 주체라고 가정한다. 본 연구에서는 일반적인 진화게임의 進化安定戰略(ESS: Maynard Smith and Price(1973), Maynard Smith(1982))의 개념을 주요 분석도구로 활용하고, 네트워크 외부성이 개입되어 보수를 사전적으로 계산해 낼 수 없을 때 遺傳알고리즘(Genetic Algorithm: Goldberg (1989), Holland(1992), Michalewicz(1996))시뮬레이션을 통하여 개방루프전략의 진화양상을 살펴본다.

1.1. 消費의 네트워크 外部性和 知識外部性

모든 소비행위에 있어서 자기와 같은 재화를 소비하고 있는 사람이 주변에 많으면 많을수록 그 재화의 소비에서 오는 효용은 더 크게 영향을 받는다. 그리고 모든 소비행위는, 크든 적든 아니면 전혀 없든간에, 어떤 형태로든 그곳에 수반되는 보완재를 필요로 한다. 여기서의 보완재란 다소 넓은 의미로 사용되는 것인데 일반적인 의미에서 특정 소비행위의 수행에 필연적으로 수반되어야 하는 대상 전반을 가리킨다.

가령 EXCEL 소프트웨어를 쓰려면 반드시 IBM호환기종의 컴퓨터와 MS-Windows 운영체제가 있어야 하며 주변에 똑같은 프로그램을 쓰는 사람이 많으면 많을수록 필요한 정보와 유틸리티의 활용이나 자료교환에 좋다. 특정의 PC통신을 이용하려면 반드시 해당 PC통신의 다른 가입자들이 있어야 하고 이들이 제공하는 정보가 있어야 하며 이런 가입

자와 정보가 많으면 많을수록 좋다. 자동차가 제 기능을 발휘하려면 도로망이 충분히 형성되어 있어야 하고 그것도 많이 형성되어 있을수록 좋다. 또한 해당 자동차의 정비 및 수리가 용이하게끔 해당 제조사의 부품 또는 A/S에 대한 접근이 수월해야 한다. 3벌식 자판을 이용하려면 반드시 어느 정도의 교육을 통하여 그 특수한 사용법에 익숙해져야만 하고 주변에 3벌식 자판이 많이 보급되어 있을수록 3벌식 자판 선택에 따른 효용은 커진다. 그밖에도 이와 같은 보완재 조합의 사례는 대단히 많이 들 수 있다.

최종재 소비의 측면에서 네트워크 또는 보완재 조합의 設置基盤(installed base)이 널리 형성되어 있으면 있을수록 소비자가 실제로 지불하는 비용에 비해 훨씬 더 높은 효용 또는 수익을 얻을 가능성이 더욱 커진다. 물론 이런 외부성의 정도는 극단적으로 큰 경우도 있고 전혀 없는 경우도 있을 것이다. 이러한 네트워크 또는 보완재 조합의 존재는 적어도 소비자의 입장에서 본다면 상품 선택의 기준을 제공하는 環境(environment)이 된다.

이러한 네트워크 외부성이 경제학의 주된 연구대상이 된 지는 꽤 오래되었다. 동일한 제품을 소비하는 여타 구매자의 수, 하드웨어의 보완재로서 소프트웨어, 애프터서비스 등을 포함한 네트워크 외부성의 개념을 본격적으로 거론한 Katz and Shapiro(1985)를 필두로, 기술독점권을 가진 스폰서의 존재와 기술채택의 시점여하에 따라 선행자의 우위 또는 후행자의 우위에 의하여 시장을 지배할 가능성이 있음을 보인 Katz and Shapiro(1986), 기타 신기술 채택시에 기존 기술의 설치기반과 불충분한 마찰을 감안하여 기업의 가격 결정 문제를 다룬 Katz and Shapiro(1992)에 이르기까지 많은 연구가 존재한다. Katz and Shapiro(1994)와 Liebowitz and Margolis(1994)는 지금까지 이루어진 이들 네트워크 외부성에 관한 연구를 종합적으로 요약하고 있다.

네트워크 외부성에서 보완재적 특성을 강조하여 Church and Gandal(1992)은 경쟁하는 두 가지 하드웨어 중 하나를 선택할 때 사용가능한 보완재적 소프트웨어의 다양성이 중요한 평가기준이 된다는 것을 보였고, Colombo and Mosconi(1995)는 기술적 보완재로부터 오는 네트워크 외부성과 이전 기간의 채택과정에서 발생한 학습효과가 기업의 생산기술선택과정에서 유의한 역할을 한다는 사실을 실증적으로 보이고 있다. 그리고 본 논문과 관련하여 Arthur(1988)는 네트워크 외부성으로 인해 발생하는 규모수익체증이 존재할 때 초기의 역사적 우연에 따라 경제는 전혀 다른 시장고착의 과정을 겪게 된다는 사실을 보였다.

지식 외부성이 존재한다는 것은 어떤 기업이 많은 비용을 들여서 개발한 기술의 일부 또는 전부를 경쟁업체들이 아무런 댓가를 지불하지 않고 흡수할 수 있는 상황을 말한다.

본 연구에서 취급하는 지식외부성이란 Silverberg et al.(1988)이 말하는 '産業內(intra-) 또는 産業間(inter-industry) 外部性' 중 어떤 것이든 상관없다.

지식외부성이 工程革新(process innovation)과 製品革新(product innovation)의 두 가지 범주에서 다 작용할 수 있음은 물론이다. 공정혁신이란 동일한 종류, 동일한 양의 제품을 생산하는 데 전보다 훨씬 적은 물적, 시간적 비용이 소요되게 하는 생산방식의 개선이다. 공정혁신으로 인하여 비용절감 또는 가격인하가 이루어진다. 제품혁신이란 기존 제품에 새로운 기능을 추가하거나 기존 기능을 개선하거나 하는 것과 같이 제품속성을 差別化(differentiation)하여 신규수요를 창출할 수 있는 일체의 신결합행위이다. 제품혁신을 구현할 수 있는 구체적인 노하우는 많은 경우 특허로 보호되어 있거나 아니면 관련 기능인력에 무형의 능력으로 체화되어 있는 경우가 많다. 그러나 이런 특별한 규제가 마련되어 있지 않다면, 혹은 그러한 규제가 어느 정도 마련되어 있다 하더라도, 지식이라는 재화의 공공재적 특성상 동태적으로 어느 정도의 기술외부성이 분명히 발생한다.

진화경제학적 입장에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 외부성과 학습효과가 일정수준 이상 충분히 존재할 때 기술확산과 채택이 보다 촉진될 수 있음을 보인 것으로 Silverberg et al.(1988)의 연구가 있다. Woekener(1993)는, 신기술은 항상 관련 기업들 사이에 어느 정도 공유되는 특성이 있으며 이로 인한 혁신의 自己觸媒的(autocatalytic)인 본성을 표현하는 개념이 바로 시너지효과라고 하였다. 그에 따르면 규제와 혁신이 서로 부정적인 영향과 긍정적인 영향을 동시에 준다는 사실에 기초하여 시너지효과가 충분히 작게 존재할 경우에는 혁신율의 동태적 균형은 안정적이고 시너지 효과가 충분히 큰 경우에는 균형이 매우 불안정하여 지속적인 불균형 과정을 겪는다. 이 경우에는 초기에 혁신과 규제가 어떤 수준에 있느냐에 따라 고혁신상태로 갈 수도 있고 저혁신상태로 갈 수도 있는 經路依存性(path-dependency)이 나타난다.

이상 많은 연구에서 네트워크 외부성 및 지식외부성을 다양한 각도에서 취급하고 있음을 보았다. 본 논문에서는 해당재화 및 보완재의 시장기반을 포함하는 네트워크 외부성의 개념을 나름대로 지표화하여 이를 2장에서 보이는 것처럼 기업의 전략에 따른 보수함수에 포함시킨다. 동시에 지식외부성의 정도를 나타내는 계수를 도입하여 이를 역시 기업의 전략에 따른 보수함수에 반영시킬 것이다.

1.2. 革新게임

기업의 혁신 및 비혁신 전략을 동태적 게임의 입장에서 다룬 연구가 몇 가지 있다. 그 중에서 가장 선구적이라고 할 수 있는 Reinganum(1981)의 연구에서는 두 기업을 대상으로

로 한 기업의 연구개발(R&D) 행동에 따른 보수가 여타 기업의 연구개발활동으로부터 영향을 받는 상황을 분석했다. 그녀의 연구에 따르면 혁신을 통한 지대선점 가능성에 불확실성이 존재할 때 동태적 게임의 내쉬균형은 사회적으로 최적인 연구개발투자를 낳지 않는다. Reinganum(1982)는 그녀의 이전 연구를 n 개 기업의 경우로 일반화하여 전과 유사한 결론을 내렸다. 그러나 이들 연구에서 균형전략은 과거의 지식축적 수준이나 과거의 전략에 대한 상호관계 등에 의존하지 않는 '개방루프' (open loop) 전략⁽²⁾이라는 점이 특징이다. 이들 연구에서 한 걸음 더 나아가 Dockner et al.(1993)은 혁신활동을, 독점지대를 노린 기술선점 경쟁으로 보고, 게임에 참가하는 기업들이 과거의 지식축적 수준에 대한 정보에 의존하여 금기의 의사결정을 내리는 '폐쇄루프' (closed-loop) 전략⁽³⁾을 분석한 결과 혁신경쟁 즉 기술선점경쟁은 기업의 연구개발활동을 보다 가속화시킨다는 결론을 내리고 있다.

그러나 이들 연구는 Reinganum(1981)을 제외하고는 기술의 공공재적인 특성 문제를 명시적으로 도입하고 있지는 않다. 그녀는 지식이 완전한 공공재적 특성을 보일 때 기업의 지식 창출은 사회적으로 최적인 수준보다 늦은 시점에 이루어지는 반면, 지식이 완전한 사유재이면 기술선점을 위해서 기업의 지식 창출은 사회적으로 최적인 수준보다 항상 먼저 이루어지려고 하는 경향이 있다고 했다.

본 연구는 이상의 동태적 혁신 게임에서 다른 내용을 생물학적 게임의 차원에서 취급하되 지식외부성과 네트워크 외부성을 보수함수에 명시적으로 도입한다.

본 연구에서는 이 중에서 과거의 전략에 의존하지 않고 현재의 파라미터에만 의존하는 개방루프전략을 다룬다. 모든 형태의 전략과 보수는 無作為個別對應(random-matching)과 ESS를 중심으로 해서 전개되며 필요한 경우 유전알고리즘 시뮬레이션 기법을 응용한다.

1.3. 構成

본 연구는 이후 2장에서 개방루프전략을 사용하는 혁신 게임을 진화게임이론의 ESS와 복제자동학의 수단을 이용하여 분석한다. 그를 위하여 1절과 2절에서는 분석의 준거가 되는 가정을 설정하고 소비자의 행동원리 및 생산자의 전략 및 보수에 대한 기본모형을 설정한다.

3장에서는 앞의 모형에 바탕을 두고 균형의 성질을 탐구한다. 더 나아가서 4장에서는

(2) 경기자가 현재 직면하고 있는 각각의 가능한 정보집합에 대하여 동일한 행동을 선택할 때 그는 개방루프전략을 취한다고 말한다(Harrald(1995, p. 462)).

(3) 경기자가 현재 직면하고 있는 각각의 정보집합마다 서로 다른 행동을 선택할 때 그는 폐쇄루프전략을 취한다고 말한다(Harrald(1995)).

네트워크 외부성을 보수함수에 본격적으로 도입한 상태에서 기술혁신전략의 진화를 살펴 보기 위하여 본 모형의 특성에 맞추어 수정된 유전알고리즘 기법에 입각하여 모의실험을 행한다.

마지막으로 5장에서는 본 연구의 내용을 요약하고 결론을 내린다.

2. 基本模型

2.1. 消費者的 價値評價

경제전체에는 L 명의 소비자가 존재한다. 그리고 서로 다른 생산기술을 지니고 서로 다른 재화를 생산하는 N 개의 이질적인 기업들이 존재한다. 이 기업들은 독점적 경쟁의 산업 구조를 형성하고 있다. 이 재화들의 집합을 S 라고 하자. 이 소비재 집합 S 는 G_1, G_2, \dots, G_T 의 T 개의 分割(partition)로 구성되어 있다. 하나의 집합 G_i 의 원소가 되는 재화들은 서로 代替財(substitutes)가 된다. 또는 競爭財(competing goods)라고도 볼 수 있다. 소비자 들은 각 집합 G_i 내의 대체재들 가운데에서 하나의 제품만을 선택하게 된다. 이제 소비자 l 이 대체재집단 G_i 내에서 하나의 제품만을 선택하게 되는데, 선택되는 재화에 대해서는 '1'을, 선택되지 않는 것에 대해서는 '0'을 대응시킨다. 이 선택구조를 '0'과 '1'로 구성된 이진수의 벡터로 표시한 것을 y_l^i 라고 표기하자. 이제 소비자 l 의 각각의 보완재집단내의 선택 y_l^i 을 나열한 $N \times 1$ 소비자 선택 벡터 $y^l \equiv (y_1^l, y_2^l, \dots, y_T^l)$ 역시 결국 다음과 같은 二進選擇(binary choice)이 될 것이다:

$$y^l : S \rightarrow \{0, 1\}.$$

여기서 y^l 전체를 구성하는 각각의 소벡터 $y_i^l : G_i \rightarrow \{0, 1\}$ 는 물론 하나의 요소만이 1의 값을 가질 것이다.

벡터 y^l 는 소비자 l 이 선택한 보완재 조합이라고 할 수 있다. 이제 소비자가 선택한 보완재 조합 y^l 을 구성하는 어떤 y_i^l 에 대해서도 소비자의 (총체적) 가치평가 V_l^i 이 다음과 같은 형태로 결정된다고 가정하자.

$$(2.1) \quad V_l^i = a_i^l y_i^l + b_i^l v_i^l - c_i^l p_i.$$

이제 식 (2.1)의 항목들을 하나씩 설명하기로 한다.

v_i^l 은 소비자 l 이 선택한 재화 i 자체의 품질에 대하여 소비자들이 부여하는 고유의 가치이다. 계수 a_i^l 은 재화 i 의 고유가치에 부여하는 비중이다.

항목 v_i^l 은 소비자 l 이 여타 재화의 선택조합을 고정시킨 상태에서 재화 i 를 선택할 경우의 네트워크 외부성을 나타내는 척도이며 다음과 같이 정의된다.

$$(2.2) \quad v_i^l = \frac{1}{T(L-1)} y_{(i)}^l \cdot (y - y^l)$$

단 여기에서 $y = \sum_{i=1}^L y^i$ 로 정의되는 벡터이다. $y_{(i)}^l$ 은 소비자 l 이 여타의 보완재조합을 고정시킨 채 재화 i 를 선택한다고 가상할 경우의 선택벡터이다. $y - y^l$ 은 l 번째 소비자를 제외한 나머지 소비자들만으로 구성된 시장에서 N 개의 소비재들이 어느 정도로 선택되고 있는가를 나타내 주는 벡터라고 할 수 있다.

네트워크 외부성을 이렇게 정의하는 것은, 관련된 보완재를 주위에서 적은 비용을 들여서 용이하게 확보할 수 있고 주변에 나와 동일한 재화를 소비하는 사람들이 많으면 많을수록 네트워크 외부성이 증가한다는 사실에 기반을 두고 있다. 그래서 나의 보완재 조합을 제외하고 나머지 소비자들만 보았을 때의 해당재화 및 그와 관련된 보완재조합의 시장 점유율 지수를 네트워크 외부성의 대리변수로 사용하는 것이다.

v_i^l 은 소비자 l 이 각각의 대체재집단 G_i 내에서 선택한 재화가 해당 G_i 내에서 높은 시장점유율을 보일수록 1에 가까운 값을 갖는다. 반대로 낮은 시장점유율을 보일수록 0에 가까운 값을 갖는다. v_i^l 가 1의 값을 가지면 소비자는 현재 선택한 보완재조합 y^l 로부터 완벽한 네트워크 외부성을 얻는다. 반면에 v_i^l 가 0의 값을 가지면 소비자는 현재 선택한 보완재조합으로부터 네트워크 외부성을 전혀 얻을 수 없다.

여기서 잠시 v_i^l 가 지니는 의미를 직관적으로 이해하는 데 도움을 주기 위하여 다음과 같은 간단한 경제의 예를 하나 들어 v_i^l 의 값을 계산해 보기로 한다.

예: A_1 부터 A_8 까지의 총 8종류의 소비재가 존재하고($N = 8$), 이들 소비재들은 $G_1 = \{A_1, A_2, A_3\}$, $G_2 = \{A_4, A_5, A_6\}$, 그리고 $G_3 = \{A_7, A_8\}$ 의 세 집단으로 구분된다($T = 3$). 경제에는 모두 5명의 소비자가 존재하고 있다($L = 5$). 전체 소비자 5명중 소비자 1은 조합 (A_1, A_5, A_7) 을, 소비자 2는 조합 (A_3, A_5, A_7) 을 선택하고 있고, 소비자 3과 소비자 4가 조합 (A_1, A_4, A_7) 을, 마지막으로 소비자 5가 (A_2, A_6, A_8) 을 선택하고 있는 상황이라고 하자.

먼저 다음과 같이 이 경제의 y^1, y^2, y^3, y^4, y^5 , 그리고 y 를 알아보자.

$$\begin{aligned}
 y &= y^1 + y^2 + y^3 + y^4 + y^5 \\
 &= \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 4 \\ 1 \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

이제 소비자 1이 재화 A_1 을 선택하는 데서 얻을 수 있는 네트워크 외부성은 다음과 같이 계산된다:

$$v_{A_1}^1 = \frac{1}{3 \cdot 4} y_{(A_1)}^1 (y - y^1) = \frac{1}{3 \cdot 4} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 2 \\ 1 \\ 1 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \\ 3 \\ 1 \end{pmatrix} = \frac{1}{2}$$

그리고 마찬가지로의 방식으로 소비자 1이, G_2 와 G_3 내에서의 선택은 전과 동일하게 유지한 채 재화 A_2 를 선택하는 경우에 얻을 수 있는 $v_{A_2}^1$ 의 크기는 $5/12$ 로 계산할 수 있다. 여기에서 확인할 수 있는 사실은, 소비자 1의 입장에서 보았을 때 재화 A_1 은 재화 A_2 에 비하여 나를 제외한 전체소비자중 더욱 많은 사람들이 소비하고 있으므로 거기에서 오는 네트워크 외부성이 훨씬 높은 값을 나타내고 있다는 것이다.

그리고 b_i 은 네트워크 외부성이 소비자의 가치평가에서 차지하는 비중이다.

마지막으로 p_i 는 재화 i 의 가격을 나타내며 계수 c_i 은 가격변수가 소비자의 총가치평가에서 차지하는 비중을 나타낸다.

우리는 식 (2.1)에서 계수 b_i 이 0의 값을 가지는 경우 바로, 네트워크 외부성이 존재하

지 않는 경우의 고전적인 선형수요함수와 본질적으로 차이가 없음을 확인할 수 있다. 또한 Arthur(1989)에서 제시된 소비자 가치평가는 식 (2.1)이 $T = 1$ 이고 $c_i' = 0$ 인 경우로 한정되는 특수한 경우라고 해석할 수 있다. 이제 일반적인 네트워크 외부성을 고려할 경우 전통적인 선형수요함수는 식 (2.1)과 같은 형태로 수정된다.

2.2. 生産者의 意思決定 및 報酬函數

이제 기업의 제품혁신 또는 공정혁신이 어떤 방식으로 식 (2.1)을 통하여 소비자의 선호에 영향을 미치는가를 살펴보자.

제품혁신은 재화의 기능이나 품질, 디자인 등의 개선 또는 보안을 통해 소비자가 그 재화에 대하여 느끼는 가치평가의 수준을 높이는 활동이라고 할 수 있다. 이제 여기서 재화 i 를 생산하는 기업이 제품혁신을 수행했을 때 그 규모는 바로 $\Delta E(v_i)$ 로 표현된다. 여기에서 E 는 기대값 연산자인데 이는 재화 i 에 대하여 여러 소비자들이 내리는 다양한 가치평가에 대해 평균을 취한 것이다. 그리고 Δ 는 증분을 의미한다. 즉 기업의 제품혁신은 시장에서 형성되는 소비자들의 평균적인 가치평가수준을 상승시키는 효과를 갖는 것으로 해석된다.

다음으로 기업의 공정혁신은 생산비용을 절감시키고 이것은 가격하락으로 연결된다고 가정한다. 이제 재화 i 를 생산하는 기업의 공정혁신이 달성된 규모는 $-\Delta p_i$ 로 표현될 수 있다.

다음으로는 생산자의 의사결정에 따른 보수가 어떻게 결정되는지를 살펴보자. 먼저 분석을 용이하게 하기 위하여 앞의 식 (2.1)에서 a_i' , b_i' , c_i' 을 어떤 代表 消費者(a representative consumer)가 보유하고 있는 상수 a , b , c 로 대체하자. 그리고 이 값은 하나의 보완재 집단에 속하는 모든 재화에 대하여 동일하고 시간이 흘러도 변하지 않는다고 가정하자. 그리고 각각의 V_i' , v_i' , v_i' , p_i 에 대하여 모든 소비자화 모든 재화에 대한 평균을 취하고 그것들을 시간의 함수로 보아 $V(t)$, $v(t)$, $v(t)$, $p(t)$ 로 표기하자. 그러면 다음과 같은 단순화된 소비자 가치평가를 얻을 수 있다.

$$(2.3) \quad V(t) = av(t) + bv(t) - cp(t)$$

이렇게 평균을 취하는 이유는 일단 아무 기업도 혁신을 취하지 않는 상태에서 모든 기업이 평균적으로 동일한 품질, 동일한 가격, 동일한 네트워크 외부성을 보유하고 있는 상황을 초기상태로 설정하고서 분석을 행하기 위해서이다. 결국 기업이 매기에 행하는 혁신

또는 모방행위는 수시로 평균적인 품질수준에 영향을 미치면서 소비자들의 선택행위에 확률적으로 영향을 미친다. 이 영향은 첫째, 제품자체의 고유한 속성인 품질 또는 가격에 직접적인 변화를 가져옴으로써; 둘째, 그 제품을 포함한 보완재조합의 품질 또는 가격의 변화가 반영된 네트워크 외부성의 크기를 변화시킴으로써 이루어진다.

그런데 우리는 여기에서 분석의 본질을 잃지 않는 범위에서 품질과 가격의 두 요인 중 하나만을 분석의 대상으로 삼기로 한다. 여기에서는 편의상 가격만을 대상으로 한다. 어떤 제품에 대한 가치평가가, 기본적으로 제품에 고유한 속성으로부터 오는가 아니면 제품과 관련된 보완재 집단으로부터 오는가로 구분할 때 품질과 가격변수는 전자에 속한다는 공통점이 있다. 질적인 면은 잠시 배제하고 가치평가에 영향을 미치는 방향만을 고려할 때 품질과 가격 요인 중 어느 하나만을 분석의 대상으로 삼아도 논의의 본질은 유지된다. 둘 다 어떤 형태로든 기술혁신을 통하여 제품고유의 속성이 변화된 크기를 나타낸다는 면에서는 같기 때문이다. 이제 단위기간당 기술혁신을 통하여 p 가 인하되는 크기를 Δk 라고 표시하자. 이 Δk 에는 바로 매기당 지식창출량이 반영되어 있다고 할 수 있는 것이다. 그리고 역시 단위기간당 기업은 그 지식창출을 위한 연구개발에 $\Delta\alpha$ 만큼의 비용을 투입하는 것으로 가정하자.

다음으로 생산자는 두 가지의 순수전략 ‘革新’ (Innovation)과 ‘非革新’ (Non-innovation)을 취할 수 있다. 비혁신전략은 다음에 보듯이 지식외부성이 존재할 때에는 소위 ‘模倣’ 전략을 의미한다고도 할 수 있다. ‘革新’ 전략을 I 전략으로 표시하고 ‘非革新’ 전략을 N 전략으로 표기하자. 이 때 생산자가 각각의 전략을 수행해서 얻는 報酬(payoff)를 다음과 같이 정한다. I 전략을 취해서 얻는 보수는, ‘기술혁신 수행 이후 소비자들이 얼마나 그 재화에 대한 소비를 증가시킬 의사가 늘어났는가’로 결정된다. N 전략 전략을 취해서 얻는 보수는 기본적으로, ‘기술혁신을 직접 수행하지 않고 혁신기업으로부터 지식외부성을 누릴 때 소비자들이 해당재화에 대하여 소비를 증가시킬 의사가 얼마나 늘어났는가’로 결정된다. 이 기본적으로 정해지는 보수에 소비자가 느끼는 네트워크 외부성의 변화에서 오는 보수를 추가하여 최종적인 보수함수가 결정된다.

소비자의 구매의사를 보수로 선택하는 이유는 매출확대능력이 기업의 시장지배력을 표현하는 효과적인 지표가 될 수 있다는 판단에서이다. 기업의 매출확대능력은 결국 소비자의 가치평가에 달려 있는 것이고 기업이 취할 수 있는 모든 전략은 이 소비자의 평가를 제고시켜 전체 인구중 되도록 많은 비율의 소비자들이 자신의 제품을 선택하게 하는 노력으로 요약될 수 있다.

이상의 가정하에서, 네트워크 외부성이 존재하지 않는 경우와 네트워크 외부성이 존재하는 경우에, 어떤 식으로 혁신단위당 보수가 결정되는지 네 가지의 가능한 전략조합에 대하여 살펴보기로 하겠다. 우선 소비자가 네트워크 외부성에 대하여 전혀 비중을 부여하지 않는 경제를 생각해보자($b = 0$).

먼저 집단내의 그 어느 기업도 혁신을 행하지 않는다면 모든 기업에게 귀속되는 보수는 아무 것도 없다. 왜냐하면 이전의 소비자들이 느끼는 가치평가수준에 아무런 변동을 야기시키지 않기 때문이다.

다음으로 여타의 기업이 모두 혁신을 수행하고 있지 않을 때 그중의 한 기업이 기술혁신을 수행해서 얻는 보수는 p 의 인하, 즉 陽의 Δk 로 표현된다. 특히 혁신을 행하는 기업은 단위당 연구개발투자액 $\Delta\alpha$ 보다는 큰 Δk 가 현실적일 것으로 생각되어 혁신을 행하는 기업에게는 항상 $\Delta k > \Delta\alpha$ 라고 가정하자. 이때 $\Delta\alpha$ 의 연구개발비용이 이미 추가적으로 투입되었으므로 기술혁신을 통한 순 지식창출규모는 $(\Delta k - \Delta\alpha)$ 가 될 것이다. 그러므로 기술혁신을 통하여 소비자들의 총가치평가는 $(\Delta k - \Delta\alpha)\Delta V/\Delta(-p)$ 만큼이 변화할 것이다. 또는 식 (2.3)으로부터 $(\Delta k - \Delta\alpha)c$ 가 된다.

반면에 집단내의 모든 기업들이 다 혁신전략을 취할 때 갑자기 한 기업이 아무런 혁신도 행하지 않는 N 전략을 취하면 보수가 어떻게 결정되는지 살펴보자. 이제 혁신을 행하는 기업의 노하우가 β 의 비율만큼 외부효과를 발생시킨다고 하자. 단 여기서 β 의 크기는 模倣費用(imitation cost)을 차감한 후의 純外部性(net externality)을 의미하며 그 크기는 $0 \leq \beta < 1$ 으로 제약된다. β 가 1에 가까울수록 지식외부성이 강하게 존재한다. 즉 혁신을 행하는 기업이 창출한 지식의 대부분을 모방할 수 있다. 반면에 β 가 0에 가까울수록 지식외부성이 약하게 존재한다. 즉 혁신을 행하는 기업이 창출한 지식을 모방하기 대단히 힘들다는 것을 의미한다. $\beta = 0$ 이면 지식외부성이 전혀 없으며 혁신기업은 연구개발성과에 대한 완벽한 독점력을 보유하는 것이다.

한편 모집단의 모든 기업들이 혁신을 취할 경우에 혁신을 취하는 기업들은 혁신으로부터 직접 창출되는 지식외에 사회전체적인 규모수익체증으로부터 야기되는 시너지효과의 일부를 누린다고 할 수 있다. 이때 한 기업이 누릴 수 있는 시너지효과의 혜택을 σ 로 표기하자. 그러면, 모집단 전체가 혁신을 행하고 있을 때 한 기업이 임의로 비혁신전략으로 돌아서서 그 모집단내에서 임의로 상대하는 하나의 혁신기업으로부터는 $\beta \cdot \Delta k$ 의 지식외부성을 누릴 것이다. 여기에 사회전체적인 기술수준의 향상으로부터 누리는 시너지효과를 감안하여 모방기업은 $\beta \cdot \Delta k + \sigma$ 만큼의 지식을 댓가없이 흡수한다. 결국 모든 기업들이

다 연구개발투자를 통해 기술혁신전략을 구사할 때 모방이라는 전략을 통하여 얻을 수 있는 보수, 소비자들의 가치평가의 증가분은 식 (2.3)으로부터 알 수 있듯이, $(\beta \cdot \Delta k + \sigma)c$ 이다.

마지막으로 임의로 만나는 두 기업이 다 혁신전략을 수행하는 경우에는 어떻게 보수가 결정되는지 살펴보자. 이것은 모집단의 모든 기업이 다 혁신전략을 취하고 있다는 것을 의미한다. 우리의 모형에서 가정대로 기술혁신이 일률적으로 Δk 만큼의 지식을 창출하는 것이라면, 모든 기업이 다같이 혁신을 통하여 한정된 소비자들을 대상으로 지대를 수취하려는 것이 된다. 그 크기는 모집단내의 여타 기업들이 다 혁신을 행하지 않을 때 혼자 혁신을 행해서 얻는 보수, 즉 $(\Delta k - \Delta \alpha)c$ 보다는 크지 않으리라고 예상할 수 있다. 또한 여타기업의 혁신의 성과와 사회전체적인 기술진보수준에 편승하는 데서 오는 보수 $(\beta \cdot \Delta k + \sigma)c$ 보다도 크지는 않으리라고 생각할 수 있다. 그렇게 생각하는 것이 합리적이다. 우리는 여기에서 모든 기업들이 다 같이 혁신전략을 취해서 독자적인 지대수취능력이 많이 손상된 후에 가져가는 보수가 단지 사회전체적인 시너지효과 σ 의 크기와 일치한다고 가정하자.

이제 표기상의 편의를 위하여 일회게임에서 연구개발지출이 단위기간당 항상 $\Delta \alpha = 1$ 로 이루어진다고 가정하자. 지금까지 離散期間(discrete time)에 대한 증분으로 사용한 Δ 를 연속시간에 대한 증분 d 로 대체하고 시간 t 에 대하여 $\dot{k} \equiv dk/dt$ 로 정의하여 우리의 게임구조를 연속시간을 대상으로 분석할 수 있도록 하자.

이상의 내용을 토대로 다음과 같이 네 가지의 가능한 전략조합에 대한 보수를 쓸 수 있다:

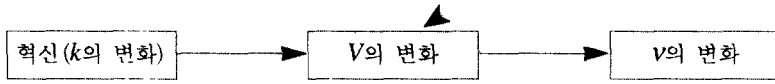
$$(2.4) \quad u(N; N) = 0$$

$$(2.5) \quad u(I; N) = (\dot{k} - 1)c$$

$$(2.6) \quad u(N; I) = (\beta \dot{k} + \sigma)c$$

$$(2.7) \quad u(I; I) = \sigma c$$

여기서 $u(A; B)$ 라고 쓴 것은 내가 전략 A를 취하고 모집단내에서 임의로 만나는 경기자가 항상 전략 B를 취할 때 내가 얻을 수 있는 보수를 표시한 것이다.



〈그림 1〉 네트워크 外部性的의 影響

다음으로는 소비자들이 그들의 가치평가에 네트워크 외부성에 대하여 일정한 비중을 부여하는 경우, 기업의 전략에 따른 보수가 어떻게 결정되는지 살펴보자. 네트워크 외부성 v 가 소비자의 의사결정에 양의 영향력을 발휘할 때 기업의 전략조합별 보수는 〈그림 1〉과 같은 과정을 거쳐서 재귀적으로 결정된다.

즉 〈그림 1〉에서 보듯이 기업의 혁신전략은 우선적으로 소비자들의 총가치평가에 영향을 미친다. 다음으로 이 가치평가의 변화는 그 재화 및 관련 보완재에 대한 수요에 영향을 미쳐 네트워크 외부성을 변화시킨다. 그리고 이 네트워크 외부성의 변화는 다시 해당 재화에 대한 총가치평가에 영향을 미친다. 이러한 과정을 고려하여 전략 조합별 보수를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$(2.8) \quad u(N; N) = 0$$

$$(2.9) \quad u(I; N) = (\dot{k} - 1)c + \delta_{IN}(v)b$$

$$(2.10) \quad u(N; I) = (\beta\dot{k} + \sigma)c + \delta_{NI}(v)b$$

$$(2.11) \quad u(I; I) = \sigma c + \delta_{II}(v)b$$

위의 식에서 $\delta_{IN}(v)$, $\delta_{NI}(v)$, 그리고 $\delta_{II}(v)$ 는 각각의 전략조합별로 해당 경기자에게 귀속되는 네트워크 외부성의 변화분이다. 이 네트워크 외부성의 변화분은 전략을 수행하는 기업차원에서 사전적으로 계산할 수가 없는 변수이다. 왜냐하면 누차 강조했듯이 이것은 여타 기업들의 행동과 소비자들의 확률적인 의사결정의 결과로 주어지는 것이기 때문이다. 달리 말하면 해당 기업의 의사결정권 외부에서 결정되는 정보인 것이다.

이제 이상에서 제시한 보수함수를 근거로 3장에서는 우선 네트워크 외부성을 고려하지 않는 경우의 게임구조를 분석한다. 이어지는 4장에서는 네트워크 외부성을 고려한 상태의 전략의 진화를 수정된 유전알고리즘 시뮬레이션을 이용하여 분석한다.

3. 네트워크 外部性이 存在하지 않는 경우의 均衡分析

앞의 식 (2.4)-(2.7)에서 제시된 보수구조를 지식외부성의 정도에 따라 구분하면 다음과 같이 지식외부성이 존재하는 경우와 전혀 존재하지 않는 두 가지 경우에 게임의 구조가 각각 Hawk-Dove형과 Dominant-Solvable형으로 구분된다는 것을 알 수 있다.

case 1: $0 < \beta < 1$

지식외부성이 존재하는 경우 이 게임은 전형적인 Hawk-Dove 게임의 보수구조와 동일한 구조를 지니게 된다. 優越戰略均衡(dominant strategy equilibrium)은 존재하지 않는다. 순수전략 내쉬균형은 (I, N) , (N, I) 의 두 가지가 존재한다. 즉 어느 한 기업이 혁신을 하면 나머지 기업은 혁신을 하지 않고 가만히 앉아서 그 창출된 지식의 많은 부분을 그냥 가져가 버리는 것이 내쉬균형이다. 그리고 유일한 혼합전략내쉬균형으로

$$(3.1) \quad \begin{matrix} & N & I \\ \begin{pmatrix} \frac{\beta k}{(1+\beta)k-1} & \frac{k-1}{(1+\beta)k-1} \end{pmatrix} & & \end{matrix}$$

이 존재한다.

case 2: $\beta = 0$

지식외부성이 전혀 존재하지 않는 경우에는, 모두 다 혁신을 하는 전략 (I, I) 이 弱優越戰略均衡(weakly dominant strategy equilibrium)이 된다. 이 전략은 동시에 내쉬균형이기도 하다.

즉 이 동시대칭게임의 경우 순수전략 내쉬균형은 모든 경우에 다 파레토최적인 결과를 나타낸다. case 2의 경우에 전략 I 는 각 기업에게 ESS가 된다는 사실은 간단히 확인된다. 모든 기업들이 혁신을 행하는 상황에서 소수의 기업들이 혁신을 행하지 않고서 외부효과만을 누리하고자 해도 그러한 기업들은 결국 도태되고 산업은 혁신을 행하는 기업들이 지배적이 된다. 그리고 안정적인 전략으로서의 혁신은 동시에 弱우월전략이고 내쉬균형전략이 된다. 즉 그 경우에는 弱우월전략, 내쉬균형전략, 그리고 ESS의 세 가지가 일치한다.

그러나 case 1과 같이 크던 적던 외부성이 존재하는 경우에는 그렇지 못하다. 우선 두 가지의 순수전략 비대칭 내쉬균형 (I, N) 과 (N, I) 는 ESS로 뒷받침될 수 없다. 외부성이 강하게 존재할 때에는 아무리 많은 기업들이 혁신을 행하고 있어도, 혁신을 행하지 않고 외부성만을 누리하고자 하는 소수의 기업이 등장하면 혁신기업은 상대적으로 적은 보수에 직면하게 되면서 시장에서 점점 도태되는 결과를 초래한다. 마찬가지로 모든 기업들이 혁신을 행하지 않고 있을 때 어떤 한 기업이 혁신을 행하면 그는 거기에서 오는 독점적 지대를 수취해가면서 보다 많은 기업이 잇따라 혁신전략을 취하게 되는 것이다. 이러한 내용들은 우리의 직관에도 잘 부합한다.

그리고 case 1의 경우에 존재하는 혼합전략 균형은, 모집단의 구성비율이 그렇게 구성된 상태는 다른 어떤 전략의 충분히 미소한 침투에 대해서도 안정성을 유지할 수 있다는 의미로 해석할 수 있다.⁽⁴⁾ 그러므로 우리는 강한 외부성이 존재하는 경우 모든 기업이 항상 혁신을 행하는 상태는 지속불가능하며, 그렇다고 해서 모든 기업이 혁신을 행하지 않는 상태 역시 지속불가능함을 알 수 있다. 혁신을 하는 기업과 그렇지 않은 기업간에 일종의 공생이 이루어지는 셈이다. 온통 혁신을 행하는 기업만이 존재할 수 없는 이유는 그 중 약간의 기업이라도 외부성의 혜택을 노리고 직접적인 연구개발을 게을리하게 되면 직접 연구개발을 행하는 것보다 더 높은 보수가 주어지므로 그 수요가 점점 늘어날 것이다. 또한 모든 기업이 혁신을 행하지 않는 상태가 유지될 수 없는 것은 일부기업이 그 상태에서 혁신을 행하게 되면 일정기간의 기술우위로 인하여 전보다 높은 독점지대를 확보할 수 있기 때문이다. 이는 마치 捕食者-먹이(predator-prey)모형에서 포식자는 먹이를 다 먹어 치우지 않고 어느 정도 살려 두는 상태가 유지되는 현상과 유사하다.⁽⁵⁾

그리고 이 혼합전략은 순수전략 I 보다는 집단전체에 더욱 높은 보수를 제공한다. 그런 의미에서 공리주의적인 관점에서도 최적이라고 할 수 있다. 이러한 사실은 다음과 같이 간단히 확인할 수 있다. 먼저 이 혼합전략에서 N 에 부여되는 확률을 $\epsilon \equiv (\hat{k}\beta)/(1 + \beta)\hat{k} - 1$ 로 표기하자. 무작위개별대응 방식 하에서 보수함수 $u(\cdot; \cdot)$ 가 ϵ 에 대하여 선형이라는

(4) 일반적으로 개별경기자의 ESS 혼합전략균형을 進化安定的 集團構成(evolutionarily stable population state)으로 해석할 수 있는 것은 순수전략의 수가 2개인 경우로 한정된다. 따라서 우리의 모형 역시 혼합전략 ESS를 진화안정적인 집단의 구성상태로 해석할 수 있다. 그러나 순수전략의 수가 2보다 크면 혼합전략 ESS는 안정적일 수 있어도 집단의 혼합구성상태는 그렇지 않을 수 있다는 사실이 알려져 있다[Maynard Smith(1982, p. 17)].

(5) 물론 Lotka-Volterra 동태방정식에서 묘사되는 포식자 먹이 모형의 경로가 순환형의 경로를 취한다는 점이 Hawk-Dove형의 ESS와는 다른 점이지만, 상태공간의 경계에 균형이 위치하지 않고 항상 모집단내에서 종이 혼합상태를 유지한다는 면에서는 맥락이 같다.

사실을 상기하자. 이때 이 혼합전략이 ESS라고 한다면 ESS의 정의상

$$u[\varepsilon N + (1 - \varepsilon)I; \varepsilon N + (1 - \varepsilon)I] \geq u[I; \varepsilon N + (1 - \varepsilon)I]$$

가 성립한다. 설령 위의 식에서 등호가 성립하는 경우라 하더라도 그 때에는 ESS의 정의상

$$\begin{aligned} u[\varepsilon N + (1 - \varepsilon)I; I] &= \varepsilon u(N; I) + (1 - \varepsilon)u(I; I) \\ &= \varepsilon \cdot (\beta k' + \sigma)c + (1 - \varepsilon)\sigma c > \sigma c = u[I; I] \end{aligned}$$

이 성립할 것이다. 즉 지식외부성이 존재하는 한, 모든 구성원이 혁신행동을 할 때 순수하게 혁신행동만을 고수하는 것보다는 혁신과 비혁신이 적절히 혼합된 행동을 평균적으로 따르는 것이 모두에게 바람직하며, 집단이 혼합전략을 따를 때 역시 그 평균적인 행동을 따르는 것이 확률 1로 혁신을 행하는 것보다는 더 바람직하다고 할 수 있다.

즉 집단내의 모든 기업이 다 혁신을 행하는 것보다는 일부기업은 모방을 하고 또 일부기업은 계속 혁신을 하고, 또 그런 과정이 계속 반복되는 것이 보다 효율적인 상태가 된다. 현실적으로도 많은 제품들이 자체적으로 개발한 지식만을 가지고 자신의 제품을 구성한다기 보다는 항상 타사 제품의 특성을 모방해 가면서 자사의 제품을 개량해 가는 것을 보아도 이를 알 수 있다. 그러므로 외부성이 존재할 때 혁신의 유인이 완전히 소멸하는 것은 아니라고 할 수 있다. 그 근본 원인은 기술혁신과정에는 항상 상당수준의 비용이 소요되며 사회전체적인 기술수준을 제고하는 시너지 효과가 수반되는 데 있다. 그러므로 지식외부성과 시너지 효과가 충분히 존재하면 기업들은 혁신과 모방전략을 적절히 섞어가면서 자신의 제품을 개량해 간다고 볼 수 있다.

이 혼합전략은 시너지 효과의 크기 또는 지식외부성의 크기와는 상관없이 항상 안정적이다. 이는 다음과 같은 複製者 動學(replicator dynamics)의 해의 안정성 여부를 판정해 봄으로써 확인할 수 있다.

현재 모집단에서 N 전략을 쓰는 개체와 I 전략을 쓰는 개체의 구성비율을 $x \equiv (x_N, x_I)$ 로 표시하자. 단 $x_N + x_I = 1$ 이 항상 성립한다. 이제 x_I 의 시간에 따른 증가율 \dot{x}_I 은 다음과 같은 미분방정식 체계로 표현될 수 있다.

$$(3.2) \quad \dot{x}_I = [u(I; x) - u(x; x)]x_I$$

식 (3.2)가 의미하는 바는, 현재의 모집단 구성하에서 내가 평균적으로 얻을 수 있는 보수 $u(x; x)$ 보다 내가 전략 I 를 수행함으로써 얻을 수 있는 보수 $u(I; x)$ 가 더 크다면 내가 전체모집단중 차지하는 비율 x_I 는 점점 증가한다는 것이다. 역으로 전자가 후자보다 더 작다면 x_I 는 점점 감소한다는 것이다.

이제 $\dot{x}_I = 0$ 으로 놓고서 식 (2.4)의 내용과 $x_N = 1 - x_I$ 를 이용하여 미분방정식 (3.2)의 해를 구해보면 다음과 같다. (단 이 해는, $x_N = x_I = 0$ 인 경우를 case 1의 경우에 무의미한 것으로 배제하고서 구한 유일한 해이다.)

$$(3.3) \quad x_I^* = \frac{\dot{k} - 1}{(1 + \beta)\dot{k} - 1}$$

이 해는 바로 식 (3.1)의 혼합전략에서 전략 I 에 부여하는 확률과 일치한다. 이 해의 안정성 여부는 비선형 체계인 식 (3.2)를 식 (3.3) 근처에서 선형근사시킨 다음 식에 의하여 판정할 수 있다.

$$(3.4) \quad \dot{x}_I \approx A(x_I - x_I^*)$$

단 여기서

$$(3.5) \quad A \equiv \frac{-\beta\dot{k}(\dot{k} - 1)}{(1 + \beta)\dot{k} - 1}$$

식 (3.5)에 σ 는 등장하지 않으며 $0 < \beta < 1$ 인 한 항상 $A < 0$ 이 성립한다. 그러므로 우리는 시너지 효과와 지식외부성이 존재하는 한 혁신을 행하는 전략과 혁신을 행하지 않는 전략이 일정한 비율로 안정적인 균형을 향하여 수렴해 감을 확인할 수 있다.

다음으로 소비자들이 그들의 제품선택시 네트워크 외부성에 대하여 충분히 높은 수준의 비중을 부여할 때 적어도 균형의 안정성은 분석적인 수준에서는 장담할 수 없는 것으로 보인다. 식 (2.8)-식 (2.11)에 제시된 보수를 근거로, 우선 식 (3.3)에서 계산된 것과 같은 방식으로 혁신을 하는 기업의 장기적인 시장점유율을 \bar{x}_I^* 라고 하면

$$(3.6) \quad \bar{x}_I^* = \frac{1 - \dot{k} - \delta_{IN}(v)}{1 - \dot{k} - \delta_{IN}(v) + \delta_{II}(v) - \delta_{NI}(v) - \beta\dot{k}}$$

으로 계산된다. 그리고 식 (3.5)와 마찬가지로 방식으로 이 해의 안정성을 판별해주는 선형 근사식의 계수를 \bar{A} 라 하면

$$(3.7) \quad \tilde{x} = \frac{[1 - \dot{k} - \delta_{IN}(v)][\delta_{II}(v) - \delta_{NI}(v) - \beta \dot{k}]}{1 - \dot{k} - \delta_{IN}(v) + \delta_{II}(v) - \delta_{NI}(v) - \beta \dot{k}}$$

로 계산될 것이다. 그러므로 이 \tilde{A} 의 부호를 통하여 식 (3.6)에 나타난 해의 안정성을 분석적으로 판별하기는 곤란하다. 왜냐하면 $\delta_{IN}(v)$, $\delta_{II}(v)$, 그리고 $\delta_{NI}(v)$ 의 크기가 극미하게 작용해야만 $A < 0$ 이 성립할 수 있는데, 이 크기들은 혁신 또는 비혁신을 행하는 해당 기업의 의사와는 상관없이 여타 보완재조합의 시장기반과 경쟁력에 의하여 결정되는 것이기 때문이다. 그러므로, 네트워크 외부성 효과가 개입되면 해의 안정성 여부가 대단히 불투명해지는데 이런 상황을 우리는 다음 절에서 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 분석해 볼 것이다.

4. 네트워크 外部性이 存在할 경우의 遺傳알고리즘 시뮬레이션

4.1. 시뮬레이션 設定

앞의 2절에서 제시한, 네트워크 외부성이 개입되지 않은 상태의 ESS와 복제자 동학은 게임의 보수구조가 일의적으로 결정되어 있다는 것을 전제로 했다. 그러나 네트워크 외부성이 개입되면 경기자는 자신의 행동만으로 자신에게 돌아오는 보수를 사전적으로 정확히 알기 어렵다. 여기에서 우리는 '制限的 合理性'을 지닌 경기자의 '適應的' 전략진화를 시뮬레이션을 통해 분석해보기로 한다.

우리가 사용하는 시뮬레이션 기법은 기본적으로 유전알고리즘을 따른다. 이 알고리즘은 고전적인 Nelson과 Winter의 관행준수적 행동 논리가 지니는 한계를 극복하는 좋은 수단이 된다. 그들의 연구에서 혁신전략과 모방전략은 기업의 행동지침으로 각인되어 있으며 경제적 진화과정에서 선별 또는 도태되는 대상은 전략이 아니라 바로 기업 자신인 것이다. 그러나 우리의 모형에서는 경제주체들이 상황에 맞추어 과거의 행동지침을 수정해가는 과정에서 모방전략과 혁신전략이 직접적인 선별 또는 도태의 대상이 된다는 점이 다르다.

다만 원래의 유전알고리즘에서 말하는 교배 양식이 우리의 모형에서는 다소 수정된 형태로 전개된다. 그 배경은 다음과 같다. 본 장에서 다루는 게임은 기본적으로 일회게임을

반복하는 것이다. 그러므로 본질적으로 동태적 게임이 아닌 정태적 게임을 단순 반복하는 과정에서 모집단의 구성이 어떻게 변화하는가를 분석하는 것이다. 여기에서 경기자가 취할 수 있는 전략으로 혁신(I)과 비혁신(M)의 두 가지만을 가능한 후보로 설정했다. 이 두 가지 전략은 이진수로 '1'과 '0'이라는 두 가지 이름으로 대표될 수 있다. 그러므로 우리의 상황은 탐색공간 자체는 대단히 협소하다고 할 수 있다. 그런 면에서 반복게임의 방대한 탐색공간에 비하면 탐색과정 자체는 매우 '單純'하다고 할 수 있다.

이제 우리의 모형이 세우는 행동가정은 다음과 같은 두 가지 이유에서 원래의 생물학적인 것과는 다르다고 할 수 있다.

첫째, 탐색의 대상이 되는 정보가 단지 두 종류의 가장 단순한 이진수 '0'과 '1'로 주어지는 까닭에 유전정보내에 접합위치를 정하는 데 문제가 있다. 표준적인 유전알고리즘의 교배에서는 두 유전자가 만나서 두 자식을 만들어내야 하는데 이 과정에서 유전자배열 내의 임의의 위치를 정해 상대의 맞은 편 유전자 정보와 자신의 나머지 쪽 유전자 정보를 접합시키는 형태의 교배가 이루어지는 것이었다. 그러나 여기에서는 교배를 통한 이진수 열 사이의 접합은 무의미하고 타인의 전략을 완전히 모방하느냐 아니면 자신의 전략을 완전히 고수하느냐의 두 가지 중 하나만이 가능하다.

둘째, 사회적 의사결정은 생물학적 차원의 무의식적 진화보다는 적극적이고 '意識的'인 측면이 강하다. 만일 생물계의 교배가 사회적 의사결정에 그대로 적용된다면, 우리는 의사결정의 변경과정에서 알게모르게 여타 개체의 열등인자를 받아 들일 가능성이 더욱 커진다. 물론 사회현실에서도 그런 상황이 종종 관찰되고 있기는 하지만 우리의 모형에서는 경기자들이 매우 뛰어난 학습과 모방능력을 가지고 있다고 전제한다.

매번의 경기가 끝나고 각 경기자들에게 돌아가는 보수가 사후적으로 결정되고 난 뒤 '평균이하의 보수를 획득한 경기자들은 평균이상의 보수를 획득한 경기자 중 임의로 하나를 택하여 그의 전략을 그대로 모방하여 다음기의 행동지침으로 삼는다. 그리고 평균이상의 보수를 획득한 경기자는 단지 평균이상의 보수를 획득했다는 데 만족하지 않고 역시 평균이상의 보수를 구현한 경기자 중 자신보다 더 나은 보수를 실현한 임의의 한 경기자의 전략을 모방하여 다음 기의 행동지침으로 삼는다.' 바로 이 과정이 우리의 모형이 설정하는 '選擇過程' (selection process)이다.

여기에는 표준적인 복제자 모형이나 유전알고리즘의 룰렛선택과는 다소 다른 측면이 있다. 표준적인 복제자 모형은 특정 유전형의 집단내 증가율을 결정하는 기준으로서 집단의 평균보수로부터의 편차를 채택하고 있다. 그러나, 평균보수로부터의 편차가 크면 그 증가

율이 비례적으로 커지는 상황이 항상 현실에서도 그대로 발생하느냐 하면 꼭 그런 것만은 아니다. 그리고 유전알고리즘의 룰렛선택⁽⁶⁾은 현실에서 실제로 그러한 선택과정이 일어난다기보다는 생존 및 도태확률을 난수에 의거하여 배분하는 하나의 이론적 기법이라는 측면이 강하다. 따라서 표준적인 복제자 동화이나 룰렛선택은 생물계의 진화가 이루어지는 방향을 수학적으로 또는 통계학적으로 설명하기 위해 도입한 일종의 가상('as if')원리라고 할 수 있다. 그보다는 우리의 모형에서 설정한 행동지침의 변경원리가 사회적 의사결정의 진화를 설명하는 데에는 더욱 타당하다고 생각한다.

이제 프로그램의 주요 알고리즘을 소개한다.

경기자인 기업의 수는 21, 보완재그룹의 수는 3, 소비자의 수는 50명으로 하였다. 그리고 단위기간당 지식창출비율은 $k = 1.2$, 지식외부성지표는 지식외부성이 존재할 경우 $\beta = 0.4$, 존재하지 않을 경우 $\beta = 0$ 로 주고, 시너지효과는 $\sigma = 0.1$ 로 주었다. 가격비중 c , 네트워크 외부성 비중 b 등은 모두 상황에 따라 적당히 다른 값들을 주어보았다. 그 구체적인 내용은 이어지는 2절에 소개될 것이다. 돌연변이율은 0.03으로 하였다.

게임을 시작하기 전에 다음과 같은 사항들을 초기화한다.

1. 모든 재화들은 각 보완재 그룹 내에서 동일한 가치평가를 가지는 것으로 전제하여, 그 때 소비자들의 선택조합 v_i 들을 동등한 조건하에 무작위로 생성한다.
2. 각 경기자(기업)의 전략을 '0' 또는 '1' 중에서 무작위로 생성한다.
3. 현재의 무작위로 생성된 소비자들의 선택조합으로부터 각 소비자(l)가 각 재화(i)에 대하여 느끼는 네트워크 외부성 지표(v_l)를 계산한다.

이렇게 초기 조건을 설정한 상태에서 다음과 같은 과정을 1세대 반복하여 새로운 집단이 형성되기까지의 과정을 1회의 게임으로 보도록 하자.

① 모든 경기자는 자신의 프로그램화된 행동지침을 가지고 자신이 속한 보완재 그룹 내 여타의 모든 경기자들과 돌아가면서 대결을 한다. 어떤 한 경기자가 이렇게 나머지 경기자들과 다 한번씩 경기를 하는 이유는, 이어지는 제⑥항에서 알 수 있듯이, 그 여러 경기로부터 얻은 보수들을 평균하여 그 경기자의 개별보수를 계산하기 위해서이다.

(6) 먼저 각 개체가 구현한 개별보수를 개체집단전체의 합산된 보수에 대하여 누적비율을 구한다. 그리고 첫번째의 난수를 한 번 발생시킨다. 각각의 개체에 대하여 그 개체의 보수의 누적비율이 그 난수보다 작을 때에는 그 개체를 도태시키고 그 다음 번의 개체에 대하여 같은 방법을 적용시켜 개체의 보수의 누적비율이 그 난수보다 제일 먼저 크게 나타나면 그 개체를 선택한다. 다시 처음으로 돌아가 새로운 난수를 한 번 더 발생시키고 지금까지 행한 방법을 개체의 수만큼 되풀이한다. 그 결과 평균 이상의 보수를 구현한 개체는 상대적으로 더 많이 선택되고 평균 이하의 보수를 구현한 개체는 상대적으로 적게 선택될 것이다.

② 앞의 ①항에서 선택한 행동을 각각의 경기자들이 취할 때 각 경기자에게 돌아가는 보수를 결정한다. 이 보수는, 우선 네트워크 외부성과 지식외부성이 개입되지 않은 상태에서, 혁신 전략의 수행 이후 자사의 제품에 대한 소비자 가치평가의 증분과 같다.

③ 앞의 ②항의 결과 변화한 소비자 가치평가 구조를 반영하여 새로운 소비자 선택조합 y' 들을 무작위로 생성한다.

④ 새로 형성된 소비자 선택조합 하에서의 각 네트워크 외부성지표 v 를 새로 계산한다.

⑤ 이전의 네트워크 외부성 지표에 대해 변동한 부분 $\delta(v)$ 를 계산한다.

⑥ 앞의 ⑤항에서 계산된 $\delta(v)$ 를 이용하여 식 (2.8)-(2.11)에 따라 각 대결에서 오는 경기자들의 보수를 최종적으로 계산한다. 이로부터 개별 경기자의 보수는, 한 경기자가 자신이 속한 대체재 집단 내의 경쟁자들과 한번씩 개별대응하여 얻은 보수를 집단 내의 경기자 수로 나누어 평균한 값으로 도출된다.

⑦ 개별경기자들의 보수를 평균하여 집단 전체의 평균보수를 계산한다.

⑧ 가장 최근의 가치평가 현황을 고려하여 새로운 소비자선택조합을 무작위로 생성하고 그에 따른 각각의 네트워크 외부성지표를 계산하여 다음 번 게임을 반복할 때의 보수결정의 근거로 기억해 놓는다.

⑨ 교배가 일어난다. 여기에서 교배란 한 경기자가 다른 경기자의 전략을 모방하는 행위를 말한다. 평균이하의 보수를 구현한 경기자는 평균이상의 보수를 구현한 경기자를 임의로 한 명 찾아 그의 전략을 모방하여 다음기의 행동지침으로 삼는다. 평균이상의 보수를 구현한 경기자는 역시 평균이상의 보수를 구현한 경기자 중에서 적어도 자신과 같거나 더 높은 보수를 얻은 한 경기자의 전략을 모방한다. 그 결과 평균이하의 보수를 구현한 전략은 도태되고 평균이상의 보수를 구현한 전략은 증식할 것이다.

⑩ 적당한 돌연변이율(본 시뮬레이션에서는 0.03)하에서 전체 경기자 중 임의의 경기자의 전략을 돌연변이시킨다. 최종적으로 한 세대가 끝나면서 위의 ⑨항과 본 ⑩항의 선택 과정을 거쳐 새로운 전략들로 구성된 집단을 확정한다.

이상의 과정을 200세대 반복하여 집단의 구성상태가 어떻게 진화하는가를 살펴보았다.

4.2. 시뮬레이션 結果

우리의 수정된 유전알고리즘을 이용하여 일회게임을 200세대 반복한 결과, 먼저 네트워크 외부성은 존재하지 않고 지식외부성만이 존재하는 경우 집단은 (I, I) 또는 (N, N) 으로 안정적으로 수렴하지 않고 대부분의 경우에 일정한 영역의 혼합전략에서 크게 멀어지

지 않았다. 예를 들어서 $\beta = 0.4$ 로 지식외부성이 존재하는 경우를 시뮬레이션해 보면 200세대에 걸친 혁신전략 구성비율의 평균은 약 38.4%로 계산되었다. 다른 여러번의 실험에서도 약간의 편차가 있었지만 전부 일정한 영역의 혼합전략에서 크게 멀어지지 않는 안정적인 상태를 유지했다.

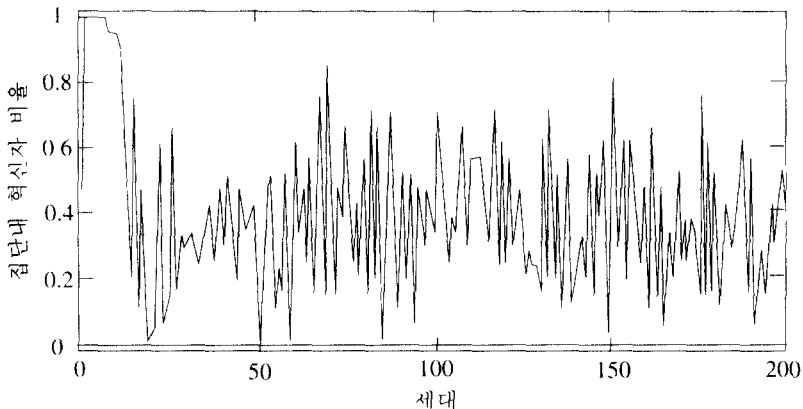
시뮬레이션 결과 간혹 혁신전략 구성비율이 아주 낮은 값 또는 아주 높은 값으로 비약하는 경우가 등장하기는 하지만 이내 도태되고 대부분의 경우 38.3%내외의 값을 유지하던 것으로 보인다. 이 실험결과를 그림으로 나타낸 것이 <그림 2>이다.

<그림 2>에서 보듯이 혼합집단구성은 평균적으로 0.384 부근에서 안정적인 구성상태를 유지하고 있다. 이는 앞의 3절에서 행한 분석결과와 크게 다르지 않다.

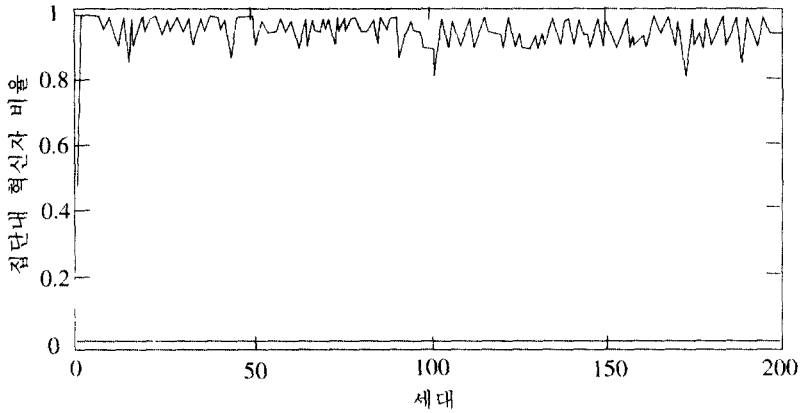
마찬가지로 지식외부성이 존재하지 않는 경우 집단 구성은 항상 혁신전략에 의해 장악된다는 사실을 확인할 수 있었다. $\beta = 0$ 인 경우의 한 수행결과를 보면 초기세대의 혁신전략의 구성비율이 47.6%에서 출발했다가 2세대에 곧바로 100%로 상승하고 이후 구성비율은 거의 그 주변에서 이어졌다. 이 경우 전략 1은 돌연변이 전략 N의 출현에 대하여 안정적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 이 결과를 그림으로 표현하면 <그림 3>과 같다.

다음으로는 네트워크 외부성이 고려된 경우의 전략의 진화를 살펴보자. 먼저 지식외부성이 존재하지 않고 네트워크 외부성이 존재하는 경우에는 대부분의 경우 혁신을 행하는 전략이 집단을 장악하는 방향으로 갔다. 그 중의 하나로서 네트워크 외부성 가중치를 $b = 0.99$ 로, 가격 가중치를 $c = 0.01$ 로 준 결과가 <그림 4>에 나타나 있다.

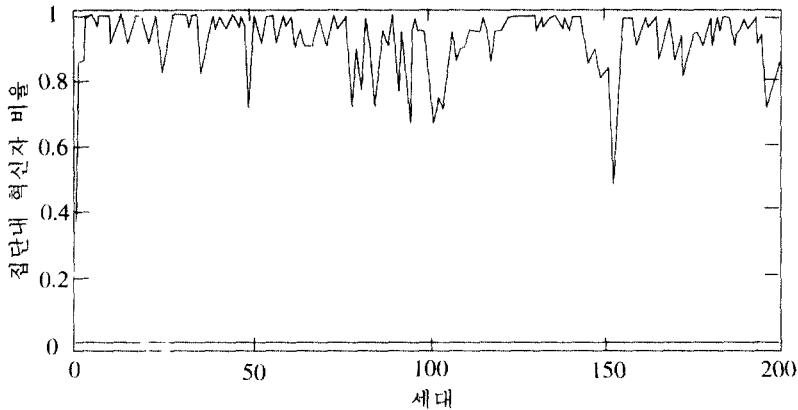
<그림 4>를 보면 간간히 혁신전략의 비율이 약 71% 또는 47% 정도의 비율로 일시적으로 하락하는 경우도 있으나 비혁신전략은 이후 곧바로 도태되고 거의 혁신전략이 집단



<그림 2> 模擬實驗結果 1



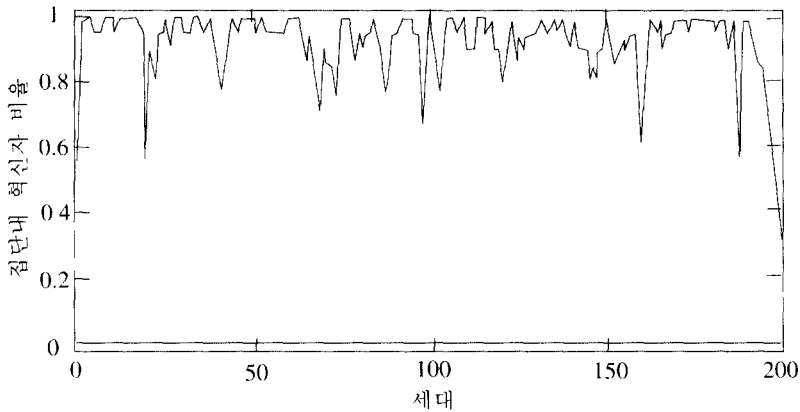
〈그림 3〉 模擬實驗結果 2



〈그림 4〉 模擬實驗結果 3

을 장악하는 양상이 계속 관찰된다.

다음으로 강한 지식외부성이 존재하고 네트워크 외부성을 고려하는 경우에는 어떤 현상이 일어나는지 살펴보기로 하자. 먼저 네트워크 외부성에 상대적으로 높은 비중을 부여하여 $b = 0.999$, $c = 0.001$ 인 경우를 실험해보았다. 그 결과, 설령 지식외부성이 존재한다 하더라도 네트워크 외부성의 비중이 큰 경우 집단 내 혁신전략의 비율이 장기적으로는 거의 1에 가까운 수준으로 형성된다는 사실을 관찰할 수 있었다. 즉 이 경우 대부분의 기업들이 혁신을 행할 유인이 있다. 이는 '네트워크경쟁이 지식외부성으로 인한 비혁신의 유인을 상쇄하고 많은 기업에게 혁신을 행할 유인을 제공한다'는 것을 의미한다. 이 중 세대를 200세대 간에 행한 실험의 한 결과가 〈그림 5〉에 표현되어 있다. 이 경우 곧바로 혁



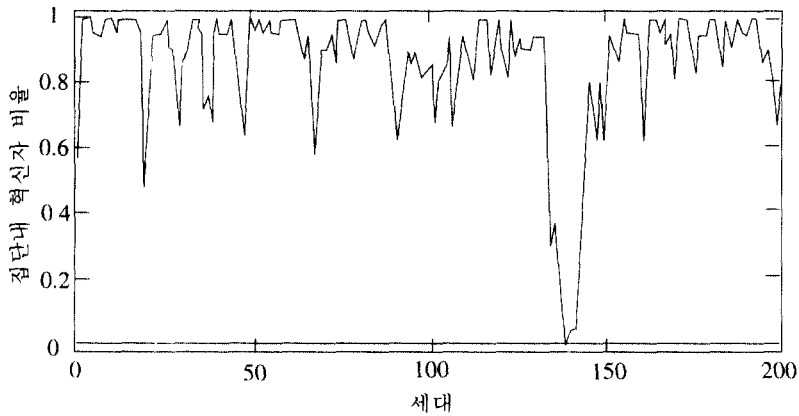
〈그림 5〉 模擬實驗結果 4

신전략이 집단의 대부분을 차지하게 된다는 사실이 관찰되고 있다. 가끔씩 비혁신전략이 돌연변이로 출현하여 (혁신전략의 비율이 20세대 57.1%, 161세대 61.9%, 190세대 57.1%, 199세대 33.3%로 줄어듦) 상당히 확산되기는 하지만 일시적인 것에 불과하고 집단 구성은 항상 혁신전략이 장악하는 경향으로 나아갔다. 여기에서는 200세대에 걸친 혁신전략 구성비율의 평균이 92.88%로서 1에 대단히 가까운 값으로 나타났다.

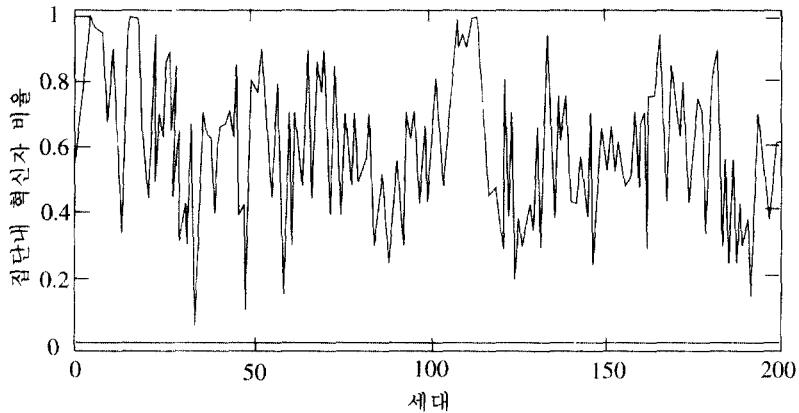
이제 동일한 설정하에 네트워크 외부성에 부여하는 가중치를 점점 낮추어보면 어떤 현상이 일어날 것인가에 대하여 살펴보기로 하자. 먼저 $b = 0.99$, $c = 0.01$ 인 경우의 결과가 〈그림 6〉에 나타나 있다.

〈그림 6〉을 보면 200세대에 걸친 혁신전략의 구성비 평균은 $b = 0.999$ 인 경우에 비하여 낮은 수치인 86.6%로 떨어져 있다. 가끔씩 비혁신전략의 비율이 커지는 경우가 발견되고, 특히 140세대를 전후하여 혁신전략의 비율이 거의 0에 가까운 수준으로 하락하고 있으나 다 일시적인 것이며 집단은 대부분의 경우 혁신전략이 비교적 높은 비율을 점하고 있다.

$b = 0.9$, $c = 0.1$ 로 네트워크 외부성의 비중을 더욱 떨어뜨린 경우, 혁신전략비율의 200세대에 걸친 평균은 약 60.9%로 떨어진다. 이 상황이 〈그림 7〉에서 나타나 있다. 그리고 더 나아가서 $c = 0.2$, $b = 0.8$ 인 경우 그 평균은 〈그림 8〉에서 보이는 것처럼 약 50.6%로 나타났다. 이처럼 혁신전략의 구성비는 b 의 값을 점차 낮추어 갈수록 감소하고 최종적으로 $b = 0$ 에 이를 경우에는 앞의 〈그림 2〉에 나타난 것과 같은, 어떤 下限의 혼합집단 구성비로 수렴하는 것을 관찰할 수 있었다. 이상의 모든 결과는 난수를 다양하게 부여한 여러 실험에서도 동일한 방향으로 나타났다.

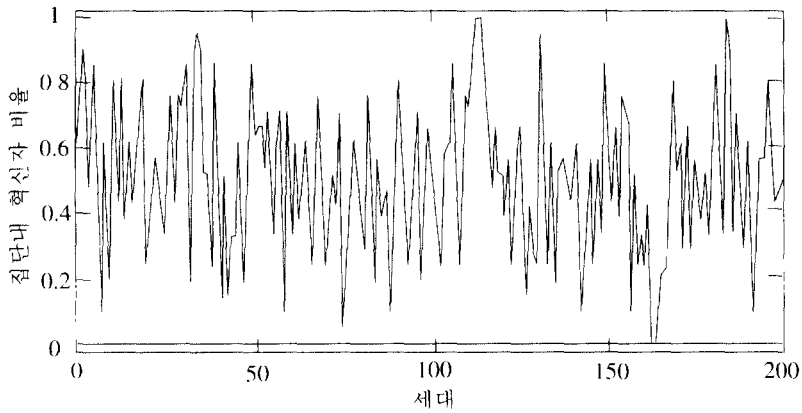


〈그림 6〉 模擬實驗結果 5



〈그림 7〉 模擬實驗結果 6

결론적으로 말해서 '소비자들이 네트워크 외부성에 부여하는 비중이 극단적으로 높을 수록 기업의 혁신경쟁이 가속화된다'고 말할 수 있다. '지식외부성이 없는 경우에는 소비자가 체감하는 네트워크 외부성의 비중과 상관없이 모든 기업들은 항상 혁신을 하려는 유인을 갖는다.' 반면에 '지식외부성이 존재하는 경우에는 소비자가 체감하는 네트워크 외부성 비중이 클 수록 기업의 혁신경쟁은 가속화된다.' 이는 종래 기업의 지대선점경쟁만으로 기술혁신경쟁의 촉진을 설명하려고 했던 Reinganum(1981, 1982), Dockner *et al.*(1993) 등의 연구에 더하여 새로운 사실이다. 우리가 전통적으로 외부성이 기업의 혁신의욕을 저하시킨다고 했을 때 그 외부성은 부정적인 효과를 갖는 것이었다. 그러나 이제 소비자가 체감하는 네트워크 외부성의 존재는 기업의 혁신경쟁에 긍정적인 효과를 부



〈그림 8〉 模擬實驗結果 7

여한다고 할 수 있다.

네트워크 외부성이 존재할 때 기업은 사전적으로 자신의 혁신전략에 따르는 보수를 확률적으로도 파악할 수 없기 때문에, 그리고 설령 그 확률분포를 파악할 수 있다고 해도 과연 그것이 정확한 행동기준으로 작용할 수 있겠느냐는 여전히 의심스럽기 때문에, 네트워크 외부성의 존재하에서 혁신경쟁의 양상을 분석적으로 취급하기는 어려운 면이 있다. 그러나, 유전알고리즘 시뮬레이션을 통해서 우리는 그 경우 기업의 혁신전략이 진화하는 방향을 알아낼 수 있는 것이다.

5. 結 論

본 연구는 네트워크 외부성과 지식외부성이 존재하는 동태적 혁신게임의 균형을 진화론적 입장에서 다루어 보았다.

진화게임이론의 ESS개념과 복제자 동학을 이용하여 개방루프 전략의 균형을 분석해 본 결과 지식외부성이 존재할 때에는 모든 기업이 다 혁신을 하거나 또는 모든 기업이 다 혁신을 행하지 않는 전략은 진화안정적이지 못하며 혁신을 행하는 기업과 그렇지 않은 기업이 공존하는 집단이 안정적인 상태가 된다.

그러나 소비자들이 네트워크 외부성에 부여하는 비중이 상대적으로 크면 기업의 기술혁신경쟁이 가속화되어 혁신을 행하는 기업의 수가 상대적으로 커지는 경향이 있다. 극단적으로 네트워크 외부성에 무한대의 비중을 부여하게 되면 모든 기업은 혁신경쟁에 몰두하게 되리라고 추측할 수 있다. 이는 지금까지 지대선점을 위한 동기로부터 기업의 기술혁

신이 가속화된다는 이론에 덧붙여 기업은 네트워크 외부성 경쟁으로부터도 기술혁신의 유인을 제공받는다는 사실을 보여준다. 그러므로 적어도 과거의 전략에 대한 기억이 없는 개방루프전략을 취하는 한, 네트워크 외부성요인은, 불안정성을 유발할지도 모른다는 우리의 예상과는 달리, 일정한 수준을 넘기만 하면 안정적인 집단구성을 유도한다고 말할 수 있다.

韓國建設技術研究院 건설기술품질센터 선임연구원

411-410 경기도 고양시 일산구 대화동 2311

전화: (0344)910-0018

팩시: (0344)910-0011

參 考 文 獻

- Andersen, E.S. (1994): *Evolutionary Economics: Post-Schumpeterian Contributions*, London, Pinter Publishers.
- Arthur, W.B. (1989): "Competing Technologies, Increasing Returns, and Lock-in by Historical Events," *Economic Journal*, **99**, March, 116-131.
- Bomze, I.M., and B.M. Poetscher (1988): *Game Theoretic Foundations of Evolutionary Stability*, Berlin, Springer-Verlag.
- Chambers, L. (ed.) (1995): *Practical Handbook of Genetic Algorithms: Applications (Vol. I), New Frontiers (Vol. II)*, Boca Raton, CRC Press.
- Church J., and N. Gandal (1992): "Network Effects, Software Provision, and Standardization," *The International Journal of Industrial Economics*, **40**, **1**, March, 239-260.
- Colombo, M., and R. Mosconi (1995): "Complementary and Cumulative Learning Effects in the Early Diffusion of Multiple Technologies," *The Journal of Industrial Economics*, **43**, **1**, March, 13-48.
- Dockner, E.J., G. Feichtinger, and A. Mehlmann (1993): "Dynamic R&D Competition with Memory," *Journal of Evolutionary Economics*, **3**, 145-152.
- Goldberg., D.E. (1989): *Genetic Algorithms: in Search, Optimization, and Machine Learning*,

Reading, Addison-Wesley.

Harrald, P. (1995): "Evolving Behavior in Repeated 2-Player Games," in L. Chambers (ed.), *Practical Handbook of Genetic Algorithm; Applications* (Vol. 1), 459-496, Boca Raton, CRC Press.

Hofbauer, J., and K. Sigmund (1988): *The Theory of Evolution and Dynamical Systems: Mathematical Aspects of Selection*, Cambridge, Cambridge University Press.

Holland, J.H. (1992): *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, Cambridge, the MIT Press.

Katz, M.L., and C. Shapiro (1985): "Network Externalities, Competition, and Compatibility," *American Economic Review*, **75**, **3**, June, 424-440.

_____ (1986): "Technology Adoption in the Presence of Network Externalities," *Journal of Political Economy*, **94**, **4**, 822-841.

_____ (1992): "Product Introduction with Network Externalities," *The Journal of Industrial Economics*, **40**, **1**, March, 55-83.

_____ (1994): "Systems Competition and Network Effects," *Journal of Economic Perspective*, **8**, **2**, Spring, 93-115.

Liebowitz, S.J., and Margolis, S.E. (1994): "Network Externality: An Uncommon Tragedy," *Journal of Economic Perspectives*, **8**, **2**, Spring, 133-150.

Maynard Smith, J. (1978): "Optimization Theory in Evolution," *Annual Review of Ecological Systems*, **9**, 31-56.

_____ (1982), *Evolution and the Theory of Games*, Cambridge, Cambridge University Press.

Maynard Smith, J., and G.C. Price (1973): "The Logic of Animal Conflicts," *Nature*, 246, 15-18.

Michalewicz, Z. (1996): *Genetic Algorithms + Data Structure = Evolution Programs*, Berlin, Springer-Verlag; 공성곤 · 김인태 · 박대희 · 박주영 · 신요안 역 (1997), 『유전자 알고리즘』, 서울, 그린.

Nelson, R.R., and S.G. Winter (1982): *An Evolutionary Theory of Economic Change*, Cambridge, the Belknap Press of Harvard University Press.

Reinganum, J.F. (1981): "Dynamic Games of Innovation," *Journal of Economic Theory*, **25**, 21-41.

- _____ (1982): "A Dynamic Game of R&D: Patent Protection and Competitive Behavior," *Econometrica*, **50**, 3, May, 671-688.
- Silverberg, G., G. Dosi, and L. Orsenigo(1988): "Innovation, Diversity and Diffusion: A Self Organization Model," *The Economic Journal*, **98**, December, 1032-1054.
- Weibull, Joergen W. (1995): *Evolutionary Game Theory*, Cambridge, the MIT Press.
- Woeckener, B. (1993): "Innovation, Externalities, and the State: A Synergetic Approach," *Journal of Evolutionary Economics*, **3**, 225-248.