

The Effect of External R&D on the Innovation Efficiency : An Empirical Study of Manufacturing Industries in Korea

Jiyoung Lee* · Chulyeon Kim** · Gyunghyun Choi**†

*Department of Industrial Engineering, Hanyang University

**Graduate School of Technology and Innovation Management, Hanyang University

외부 R&D가 혁신 효율성에 미치는 영향 분석 : 국내 제조 산업을 중심으로

이지영* · 김철연** · 최경현**†

*한양대학교 산업공학과

**한양대학교 기술경영전문대학원

The external R&D, which includes the adoption of the external technology and knowledge in addition to the internal R&D, is one of important factors for the innovation. Especially for small and medium-sized enterprises (SMEs), the external R&D has been considered as a key factor to carry out the innovation more efficiently due to the limitations of their resources and capacities. However, most of extant studies related to external R&D have focused on analyzing the influence of external R&D on innovation outputs or outcomes. Only a few studies have explored the impact of external R&D on the innovation efficiency. This study therefore investigates whether the external R&D effects the industry's innovation efficiency and productivity. On this study, we used Korean manufacturing industry data of SMEs from 2012 to 2014 and employed a global Malmquist productivity analysis technique, which is based on the Data Envelopment Analysis (DEA), to assess the innovation efficiency and productivity. Innovation performances of external R&D group and internal R&D group are compared. Then, the sectoral patterns of both innovation efficiency and productivity are analyzed with respect to the technological intensity, which is introduced by OECD. The results show that the gap of innovation efficiency between external and internal R&D groups has gradually decreased because of the continuous improvement of the external R&D group's performance, while the external R&D group lag behind the internal R&D group. In addition, patterns of the innovation efficiency and productivity change were different depending on the technological intensity, which means that the higher the technological intensity, the greater the effect of external R&D.

Keywords : Innovation Efficiency, R&D, External R&D, Technological Intensity, Manufacturing Industry

1. 서론

빠르게 변하는 기술로 인해 제품 수명이 짧아지고 기

업간 경쟁이 치열해짐에 따라 기업들은 경쟁 우위 확보와 지속적 성장을 위해 혁신을 위한 R&D에 많은 투자를 하고 있다. 그러나 기술의 고도화와 복잡성이 더해져 혁신 투자에 의한 기업 성과의 불확실성이 증대되었다[27]. 그에 따라 기업들이 주어진 환경 속에서 혁신을 보다 성공적으로 수행하기 위한 방법으로 내부의 지식 뿐 아니라

Received 14 November 2016; Finally Revised 27 December 2016;
Accepted 28 December 2016

† Corresponding Author : ghchoi@hanyang.ac.kr

외부의 지식을 다양한 경로를 통해 활용하는 개방형 혁신(open innovation)의 패러다임이 대두되고 있다[8].

우리나라 중소기업은 2012년 자료를 기준으로 전체 제조업 사업체 중 99.42%, 제조업 종사 인력의 76.37%를 차지하여 한국 경제에 큰 부분을 차지하고 있으나 기업 역량 측면에서는 대기업과의 격차가 줄어들지 않고 있다[33]. 따라서 중소기업에게 꾸준한 R&D와 혁신을 통한 지속적 경쟁력 확보는 매우 중요한 도전과제이다[39].

일반적으로 중소기업은 대기업에 비해 R&D 자원확보의 어려움으로 인해 기업 자체적인 R&D뿐만 아니라 외부의 기술과 지식을 효율적으로 활용하는 외부 R&D 또한 매우 중요하다[32]. 외부 R&D는 외부의 기술이나 지식 등을 활용하여 R&D를 수행하는 것을 의미하며 전략적 R&D 협력, 위탁 개발, 기술 이전 등이 포함된다[11, 43]. 이를 통해 외부 기관이 보유한 기술을 활용할 수 있게 하여 기술 기반을 확장시키며 상호간 정보교류를 확대하는 등 보다 효율적인 혁신활동이 가능하다[29, 45, 52]. 특히 중소기업의 경우 이러한 외부와의 R&D협력은 기업 자체가 가진 역량 이상의 기술 자원 활용을 가능하게 하여 경쟁력 강화에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[45].

이러한 관점에서 기존의 많은 연구들이 외부 R&D 활용과 기업의 혁신 및 경영 성과의 관계를 실증적으로 분석하였다[1, 2, 4, 8, 10, 12, 15, 18, 22, 24, 28, 34, 38, 40-42]. 그러나 이러한 연구들의 대부분은 혁신을 위한 투자는 고려하지 않고 혁신으로 인한 매출이나 특허 수와 같은 양적인 산출 규모에 초점을 두고 있어 외부 R&D가 혁신의 투입 대비 산출을 나타내는 효율성에 미치는 영향에 대한 연구는 부족한 실정이다. 특히 혁신 투입 규모가 대기업에 비해 절대적으로 작은 중소기업은 제한된 R&D 자원 내에서 효율적 혁신 성과 도출 방안을 모색한다는 점을 고려했을 때 혁신 효율성에 대한 외부 R&D 영향 분석이 필요하다[48]. 또한 분석 대상의 특성을 고려하지 않아 국가나 산업, 지역에 따라 그 결과에 일관성이 부족하다.

본 연구에서는 우리나라 중소기업을 대상으로 외부 R&D 활용이 혁신 효율성과 생산성 변화에 미치는 영향을 분석하여 중소기업에 있어 외부 R&D의 중요성을 파악하고자 한다. 이를 위해 ‘중소기업 기술 통계 조사’ 자료를 사용하여 한국표준산업분류(KSIC : Korean Standard Industry Code)에 따라 분류된 제조 산업들을 대상으로 실증적 분석을 수행한다. 혁신 효율성 및 생산성 변화 측정에는 자료포락분석법(DEA) 기반의 글로벌 Malmquist 생산성 분석을 활용한다. 추가적으로 혁신의 전략적 중요도를 나타내는 기술집중도에 따라 외부 R&D 활용이 혁신 효율성 및 생산성 변화에 어떤 영향을 미치는지 함께 분석하고자 한다.

2. 이론적 배경 및 선행연구

2.1 외부 R&D와 혁신 성과

빠른 기술 변화와 글로벌 경쟁 강화 속에서 혁신 경쟁 또한 치열해지고 있다. 특히 중소기업은 충분한 자원을 확보하기 어렵기 때문에 자체 R&D뿐만 아니라 외부기업이나 기관과의 공동 연구개발이나 위탁 개발, 기술 도입 등 외부 R&D를 효과적으로 활용하는 것이 필요하다[24, 32]. 이러한 외부 R&D의 활용은 혁신 성과 향상에 다음과 같은 긍정적 영향이 있다. 첫째, 외부기관들이 보유하고 있는 서로 다른 상호보완적인 자원(complementary external resources)들을 필요에 따라 효율적으로 활용할 수 있어 혁신 성과를 향상시킨다[1, 18, 27, 30]. 둘째, 외부기업이나 기관과의 정보 교류를 확대하여 다양한 정보를 조기에 획득할 수 있어 R&D와 혁신 과정에서의 불확실성을 감소시킨다[1, 17, 27, 28, 30]. 셋째, 여러 기업에 걸쳐 전체 투자 규모와 지식 기반을 확대하여 규모의 경제 효과를 기대할 수 있다[1, 27, 28]. 마지막으로 상호 학습을 촉진시켜 단기간의 지식 축적을 통해 제품개발 소요 시간을 단축시킬 수 있다[17, 27, 47].

많은 연구들이 외부 R&D가 혁신 성과 또는 기업 성과에 미치는 영향을 실증적으로 분석하였다. Ahuja[1]는 화학 공업 종사 기업의 자료(1981~1999)를 통해 R&D 협력이 혁신 성과인 특허 건수에 직·간접적으로 긍정적인 영향을 미친다는 것을 확인하였다. Kim[29]은 부산 지역의 중소기업을 대상으로 설문조사를 통해 외부 기관과 기술 협력 횟수가 특허, 신제품 개발 건수, 기존 제품 개선 건수 등을 포함한 기술 혁신 성과에 긍정적 영향을 미치는 것을 확인하였다. Powell et al.[44]은 바이오산업의 기업을 대상으로 외부 기업과의 협력을 맺은 기업이 그렇지 않은 기업들보다 더 급속하게 성장하고 있음을 보여주었다. Love and Mansury[36]는 미국 서비스 기업에서 고객이나 공급자와의 전략적 제휴가 새로운 서비스를 개발하는데 유의한 영향을 준다는 것을 보였다. Hwang et al.[24]은 중소기업의 외부 R&D 협력이 기업의 재무성과에 도움이 된다는 것을 보였으며, 이 밖에도 많은 연구들이 외부 R&D의 전략적 활용이 혁신 및 경영 성과에 미치는 영향들을 실증적으로 분석하였다[2, 10, 18, 19, 48, 51, 54]. 반면 Tsai and Wang의 여러 연구에서는 외부 지식이나 기술의 전략적 라이선싱이 혁신 및 경영 성과에 영향을 주지 않는다고 나타났으며[49-51] 비교적 최근에 수행된 Grimpe and Kaiser[13]와 Berchicci[4]의 연구에서는 특정 수준까지는 외부 R&D가 혁신 성과에 긍정적인 영향을 미치지만 그 수준을 넘어가면 부정적인 영향을 준다고 주장하였다. 기존 연구들은 대부분 회귀분석을 통해

외부 R&D가 절대적인 혁신 산출 규모에 미치는 영향을 분석하는 것에 초점을 맞췄다. 대부분의 연구 결과, 외부 R&D의 긍정적 영향이 검증되었지만 몇몇 연구에서는 지역이나 산업에 따라 그 영향에 차이가 있음이 확인되었다.

Hwang et al.[24]는 다수의 기존연구에서 외부 R&D가 혁신 성과에 긍정적인 영향을 미친다는 것을 보여주었지만 보다 정확한 분석을 위해서는 산업별 혁신 특성을 고려하는 등 다양한 분석이 필요함을 언급하였다. 이러한 맥락에서 기존 연구에서는 주로 Pavitt[42]에 의해 제안된 혁신의 목표, 혁신 제품의 지향점, 혁신의 원천 등에 따라 산업을 분류한 ‘산업혁신체제(technological regime)’를 고려하거나, 매출 대비 혁신에 대한 직·간접 투자로써 혁신의 전략적 중요도를 나타내는 OECD[21]가 정의한 ‘기술집중도(technological intensity)’를 이용하여 혁신 성과 분석을 수행하였다. Santamaria et al.[46], Heidenreich [22], Tsai and Wang[51] 등의 연구를 통해 기술집중도에 따라 혁신 활동 특성에 차이가 있다는 것이 확인되었다. Santamaria et al.[46]는 경쟁력 확보를 위한 기업 간 전략적 제휴가 기술집중도가 낮거나 중간에 속하는 LMT(Low-and-Medium-Technology) 산업보다 기술집중도가 높은 HT(High-Technology) 산업에서 더 긍정적인 영향을 미친다는 것을 실증적으로 보였다. Heidenreich[22]은 LMT 산업들의 혁신은 공정, 조직, 마케팅 혁신으로 특징지어지며 외부로부터 장비, 기계 또는 소프트웨어를 도입하는 데에 R&D 비용 중 많은 비중을 투자함을 보였다. 특히 Tsai and Wang[51]의 연구에서는 기술집중도가 낮은 산업에 속한 제조 기업에서는 외부 지식 및 기술 활용이 기술 혁신 성과에 유의한 영향을 미치지 않는다는 결과를 제시하였다. 이러한 기존 연구들은 기술집중도에 따라 혁신 특성이 다르고 외부 R&D의 형태나 효과에도 차이가 있음을 시사하였으며, 그에 따라 본 연구에서는 외부 R&D 활용 효과에 대한 보다 깊이 있는 분석을 위해 기술집중도에 따른 효과 차이를 실증적으로 분석하고자 한다.

2.2 혁신 효율성 및 생산성 변화 분석

외부 R&D의 활용이 혁신 효율성에 미치는 영향을 분석한 기존 연구의 효율성 산출에는 회귀분석과 자료포락 분석법이 사용되었다. Shin and Im[48]은 R&D 투자비와 인력을 독립변수로 설정하여 R&D 산출에 주는 영향을 회귀 식을 추정한 뒤 특정 투입 수준에서 기대되는 추정된 산출 값과 실제 산출 값을 비교해서 혁신 효율성을 도출하였다. 그러나 혁신 성과는 단일 변수만으로 측정하기 어렵고 다양한 형태로 발생하기 때문에 Baek and Noh [2], Min et al.[38] 등의 연구에서는 다수의 투입과 산출을 동시에 고려하여 효율성을 측정할 수 있는 대표적인

비모수 방법론 중 하나인 자료포락분석법(DEA; Data Envelopment Analysis)을 이용하여 혁신 효율성을 분석하였다.

DEA는 1978년 Charnes et al.[7]에 의해 처음 소개되었으며 다중 투입과 산출의 구조를 지니는 의사결정단위(DMU; Decision Making Unit)의 상대적 효율성을 측정하는 방법으로 다양한 분야에 널리 사용되었다. DEA는 분석 대상 중 투입 대비 가장 많은 산출을 낸 DMU들로 효율적 프런티어를 구성하여 생산가능집합을 정의하고 프런티어로부터 떨어진 거리를 기준으로 효율성 값을 측정한다. DEA의 결과로 DMU의 효율적인 정도를 나타내는 0-1사이의 값을 갖는 효율성 점수(efficiency score)가 도출되며 이 값은 1에 가까울수록 효율성이 높음을 의미한다[7]. 대표적인 DEA 모델로는 투입을 n배 증가했을 때 산출도 n배 증가하는 최적 규모를 가정하는 불변규모수익(CRS; Constant Returns to Scale) 가정의 CCR 모형[7], 규모의 경제성(IRS; Increasing Returns to Scale)과 불경제성(DRS; Decreasing Returns to Scale)이 존재하는 상황을 고려할 수 있는 가변규모수익(VRS; Variable Returns to Scale) 가정의 BCC 모형[3], 산출을 고정한 채 최대로 줄일 수 있는 투입 수준으로 효율성을 측정하는 투입기준(input-oriented) 모형과 투입을 고정하고 최대로 늘릴 수 있는 산출 수준으로 효율성을 측정하는 산출기준(output-oriented) 모형이 있다.

투입기준 BCC 모형에서 k번째 DMU의 효율성은 다음과 같은 선형계획법을 통해 산출된다.

(Model 1)

$$\theta^{k*} = \min_{\theta, \lambda} \theta^k \quad (1)$$

subject to

$$\theta^k x_m^k \geq \sum_{j=1}^J x_m^j \lambda^j \quad (m = 1, 2, \dots, M); \quad (2)$$

$$y_n^k \leq \sum_{j=1}^J y_n^j \lambda^j \quad (n = 1, 2, \dots, N); \quad (3)$$

$$\lambda^j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, K) \quad (4)$$

$$\sum_{j=1}^J \lambda^j = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, K) \quad (5)$$

θ^k = k번째 DMU의 효율성 점수

x_m^k = k번째 DMU의 m번째 투입 변수 수준

y_n^k = k번째 DMU의 n번째 산출 변수 수준

λ^j = DMU_j의 가중치

식 (1)은 산출을 고정시킨 채 투입을 최대로 줄일 수 있는 비율을 찾는 목적식에 해당하며, 식 (2), 식 (3)은 k번째 관측치의 투입을 θ^k 만큼 줄이더라도 생산가능집합(PPS; Production Possibility Set)에 여전히 포함되어 있어야 함을 의미한다. 식 (4), 식 (5)는 DMU들의 가중치에 대한 제약

에 해당하며 식 (5)를 제외하면 CCR 모형이 된다.

DEA 기반의 R&D 효율성과 외부 R&D와의 관계를 분석한 대표적인 연구로 Baek and Noh[2]의 연구가 있으며 DEA를 통해 2006~2009년 기간 동안의 R&D 효율성을 측정하고 회귀분석을 통해 개방형 혁신 전략과의 관계를 분석하였다. 하지만 각 시점마다의 R&D 효율성 따로 산출하여 비교함으로써 DMU 간의 상대적인 효율성을 측정하는 DEA 특성 상 시간에 따른 동태적 영향을 분석하기에 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 DEA를 기반으로 한 다시점(multiple-period) 효율성 및 생산성 변화 분석 방법인 글로벌 Malmquist 생산성 분석을 사용하고자 한다. 또한 Baek and Noh[2]는 아웃소싱이나 기술도입, 자금도입과 같은 외부 R&D의 정도(intensity)와 R&D 효율성의 관계에 집중하였으나 이를 분석하기에 앞서 본 연구는 보다 근본적인 질문인 외부 R&D를 활용하지 않은 경우와 활용한 경우의 R&D 효율성의 차이가 존재하는지에 초점을 맞추고자 한다.

Malmquist 생산성 분석은 패널자료(panel data)를 사용하여 분석 대상의 생산성 변화를 측정하는 분석 기법으로 1982년 Caves et al.[6]에 의해 처음 소개되었다. Malmquist에서 생산성 변화의 개념은 시간의 흐름에 따른 기술 변화(진보/퇴보)와 변화된 기술 수준을 기준으로 측정된 효율성 변화를 모두 포함한다는 점에서 앞서 언급된 단일 시점을 기준으로 한 DEA 효율성과는 차이가 있다. Malmquist 생산성 분석을 통해 도출되는 Malmquist 생산성 지수(MPI; Malmquist Productivity Index)는 시점 t에서 t+1로 변화될 때의 생산성 변화를 표현하는 지표이며 거리함수(distance function)의 개념을 활용하여 정의된다. 이 때 사용되는 거리함수는 DEA의 CCR 모형에서 도출된 효율성 지표의 역수(inverse)에 해당한다. 이러한 DEA와의 관련성을 바탕으로 DEA 모형을 기반으로 한 Malmquist 생산성 분석은 1994년 Fare et al.[12]에 의해 발전되었다.

Malmquist 생산성 지수는 앞서 언급된 바와 같이 t시점에서 t+1시점으로 변화할 때의 기술의 진보/퇴보에 따른 프런티어의 확장/축소를 나타내는 프런티어 변화 효과(Frontier-shift effect)와 프런티어와 DMU의 격차 확대/축소를 의미하는 추격 효과(Catch-up effect)로 분해할 수 있으며 두 효과의 절대적 크기 비교를 통해 어떤 요인이 생산성 변화에 더 주요하게 작용하였는지 알 수 있다. 기존의 Malmquist 생산성 지수는 3개 이상 시점을 비교하는 경우 지수로써 이행성(circularity)을 만족시키지 못한다는 문제점이 있어 이를 해결하기 위해 전 기간에 걸친 모든 DMU로 단일 생산가능집합을 구성하여 분석하는 글로벌 Malmquist 생산성 지수가 개발되었다[41].

기업, 산업, 지역 등의 혁신 성과 분석에도 Malmquist 생산성 분석 기법이 활용되었으며 Yuan et al.[55]은 Malm-

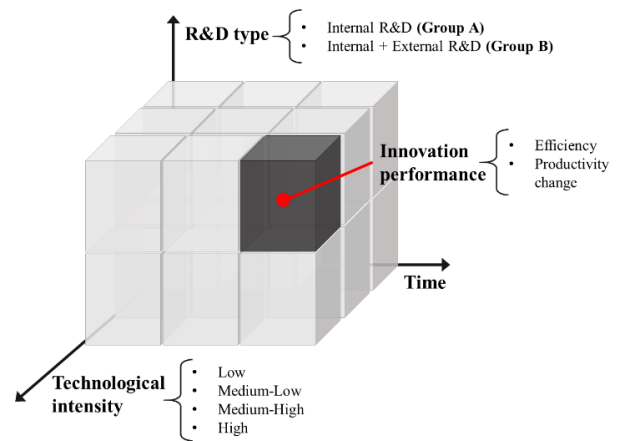
quist 분석을 통해 중국 동부지역이 중서부 지역보다 추격 효과로 인해 효율성이 높다는 것을 보였다. Lu and Liu [37]는 대만의 IC(Integrated Circuit)산업에 속한 기업들의 R&D 생산성 변화는 주로 프런티어 변화에 의해 이루어짐을 확인하였다. 최근 연구로 Guan et al.[15]은 네트워크의 관점에서 중심성(degree centrality)이나 구조적 공백(structural holes)등과 같은 R&D 협력 네트워크의 구조적 특성이 R&D 효율성 변화와 성과에 긍정적인 영향을 준다는 것을 Malmquist와 회귀분석을 통해 확인하였다. 본 연구에서는 Malmquist 생산성 분석을 활용하여 외부 R&D 활용 여부에 따라 혁신 생산성이 어떻게 변화하며 그 원인이 무엇인지 심도 있게 분석하고자 한다.

3. 분석 방법

3.1 연구 모형

본 연구는 외부 R&D가 혁신 효율성과 생산성 변화에 미치는 영향을 파악하는데 그 목적이 있다. 따라서 혁신 효율성 및 생산성 변화를 측정하고, 외부 R&D의 활용 여부에 따라 어떻게 달라지는지 분석하고 산업별 혁신에 대한 집중 정도에 따라 그 영향이 어떻게 달라지는지 분석하고자 한다. 본 연구의 연구 모형을 정리하면 <Figure 1>과 같으며 다음과 같은 내용을 분석하고자 한다.

- (1) 내부 R&D만 수행한 경우(Group A)와 외부 R&D까지 함께 수행한 경우(Group B)의 혁신 효율성 차이
- (2) 시간에 따른 Group A와 Group B의 혁신 효율성 및 생산성 변화 추이
- (3) 기술집중도에 따른 외부 R&D의 활용이 혁신 효율성 및 생산성 변화에 미치는 영향 차이



<Figure 1> Conceptual Research Model

3.2 분석 설계

3.2.1 분석 자료

본 연구에서는 대한민국 중소기업청에서 실시하고 있는 ‘중소기업 기술 통계 조사’ 자료를 활용하고자 한다. 이 설문조사는 중소기업들의 혁신 활동 실태를 조사하여 향후 혁신 지원 정책 개발에 활용하는 것을 목적으로 한다. 본 연구에서 활용한 자료는 2012~2014년 기간의 자료이며 각 시점에서의 응답 기업 수는 1627, 1779, 2636 개 이다. 분석 DMU는 제 9차 KSIC의 산업 소분류 단위로 선정하였다. 이에 따라 3개 시점에 대해 자료가 모두 존재하는 59개 산업에 대해 내부 R&D만 수행한 기업으로 구성된 경우(Group A)와 내부뿐만 아니라 외부 R&D도 수행한 기업으로 구성된 경우(Group B)를 구분하여 118개 DMU를 대상으로 분석을 수행한다. 두 가지 R&D 유형은 기술·연구개발비의 자체 사용(내부 R&D) 이외에 공동 개발비, 위탁 개발비, 기술도입비에 해당하는 외부 사용(외부 R&D) 유무에 따라 구분하였다. 편의를 위해 이하 논문에서 두 가지 R&D 유형을 Group A와 Group B로 표기한다.

혁신은 복잡하고 다양한 상호작용을 거쳐 투입이 산출로 전환되는 과정이기 때문에 이에 소요되는 시간(Time-lag)의 중요성을 언급하고 이를 반영한 다수의 기존 연구가 존재한다[9, 14, 20, 26]. 반면 Hollanders and Celikel-Esse[23]와 Hashimoto and Haneda[20]와 같은 몇몇의 실증 연구에서는 혁신 산출이 발생하기까지의 time-lag이 혁신 효율성에는 큰 영향을 주지 않으며 설정한 time-lag의 변화에 따른 결과에 유의한 차이가 없다고 보고하였다. 이렇듯 time-lag에 대해서는 아직까지 일관된 견해가 존재하지 않으며 Jeon and Lee[25], Lee et al.[31] 등의 연구에는 이를 고려하지 않았다. 또한 Nasierowski and Arcelus[40]에 언급된 바와 같이 이론적 발전 상황과 데이터의 수집 가능성 측면에서 time-lag을 정확히 반영하기가 매우 어렵기 때문에 아직까지 보편적으로 적용 가능한 time-lag

산정 기준은 존재하지 않는다. 이를 바탕으로 본 연구에서는 설문조사 문항 중 time-lag를 추정할 수 있는 ‘R&D 소요 기간’을 분석하였으며 R&D 진척단계에서 평균 6.9개월(표준편차 1.6개월)이 소요되는 것으로 나타났으며 설문 조사 간격이 1년이기 때문에 이 결과를 실제 분석에는 반영할 수 없어 1년의 time-lag을 가정하고 투입-산출의 상관관계를 분석하였으나 유의한 상관관계가 존재하지 않았다. 따라서 본 연구에서 확보된 자료에서 실증적으로 유의미한 time-lag이 존재하지 않았기 때문에 분석에 고려하지 않았다.

3.2.2 혁신 효율성 및 생산성 변화 분석

본 연구에서는 투입기준 BCC 모형(Model 1) 기반의 글로벌 Malmquist 생산성 분석을 이용하여 혁신 효율성과 생산성 변화를 분석하였고 각각 글로벌 효율성과 Malmquist 생산성 변화로 측정된다. 본 연구에서는 혁신 효율성을 측정할 기존 문헌 검토를 바탕으로 혁신 효율성 평가에 가장 많이 활용된 투입과 산출 변수들을 선정하여 글로벌 Malmquist 분석을 적용하고자 한다. 투입 변수로는 혁신을 만드는 주체에 해당하는 R&D 인력(R&D employee)과 혁신에 대한 투자를 나타내는 R&D 비용(R&D expenditure)을 선정하였다. 산출 변수로는 <Table 1>의 New products를 사용하고자 하였으나 설문조사 문항에 포함되지 않은 관계로 이를 간접적으로 반영할 수 있는 기술개발 성공 횟수(Successful innovation)를 선정하였고, 혁신 수행 과정에서 등록된 특허를 포함하여 실용신안, 상표, 디자인권과 신지식재산권이 포함된 지적재산권(IPs; Intellectual Property rights)을 선정하였다.

기존의 많은 연구를 통해 다양한 형태의 DEA 모형이 R&D 효율성 평가에 활용되어 왔지만 많은 연구에서 BCC 모형을 채택하였다[9, 25, 31, 35, 53]. 그 이유는 R&D 활동에서의 규모의 수익 형태가 일정하다고 가정하는 CCR 모형을 적용할 경우에는 지나치게 엄격한 기준이 적용되기 때문에 CCR 모형보다 유연하며(flexible) 현실 상황을

<Table 1> Variables, Descriptions and References for Innovation Efficiency

Type	Variable	Description	References
Input	R&D employee	The number of R&D dedicated personnel	Brown and Svenson[5], Cruz-Cazares et al.[9], Guan and Chen[14], Jeon and Lee[25], Kaihua and Mingting[26], Lee et al.[31], Lee et al.[34], Nasierowski and Arcelus[40], Wang and Huang[53], Zhong et al.[56]
	R&D expenditure	The amount of R&D expenditure	Brown and Svenson[5], Cruz-Cazares et al.[9], Guan and Chen[14], Hashimoto and Haneda[20], Jeon and Lee[25], Kaihua and Mingting[26], Lee et al.[31], Lee et al.[34], Nasierowski and Arcelus[40], Zhong et al.[56]
Output	New products	The number introduction of new or significantly improved products	Brown and Svenson[5], Cruz-Cazares et al.[9], Guan et al.[16], Guan and Chen[14],
	Patents	The number of applied patents	Brown and Svenson[5], Cruz-Cazares et al.[9], Guan and Chen[14], Hashimoto and Haneda[20], Jeon and Lee[25], Kaihua and Mingting[26], Lee et al.[31], Lee et al.[34], Liu and Lu[35], Zhong et al.[56]

잘 반영하는 가변규모수익(VRS) 가정의 BCC 모형을 적용하고자 한다. 또한 효율적 투입 배분을 지향하는 관점에서 투입 기준 모형을 적용하였다. 분석에 사용된 투입 및 산출 변수들의 2012~2014년 동안의 주요 통계량은 <Table 2>과 같다.

<Table 2> Summary Statistics of Variables

Variables	Min.	Max.	Mean	St.dev
R&D employee (person)	1	53.44	6.16	4.77
R&D expenditure (₩1,000,000)	10	9,278	627.6	871.46
Successful innovation (number)	0	50.08	2.21	3.78
IPs (number)	0	2.5	0.173	0.292

Note : R&D expenditure includes both internal and external R&D expenditures.

3.2.3 기술집중도

OECD[21]는 국제표준산업분류(ISIC; International Standard Industry Classification) Rev.3을 기준으로 기술집중도 수준에 따라 전체 산업을 Low-Tech, Medium-Low-Tech, Medium-High-Tech 그리고 High-Tech의 4가지 유형으로 분류하였다. 본 연구에서는 KSIC에 속한 산업들을 OECD의 4가지 기술집중도 유형에 해당하는 산업과 유사성을 고려하여 대한민국 전체 산업을 <Table 3>과 같이 4가지 유형별로 분류하였다. 분류 결과 Medium-High-Tech와 Low-Tech에 속하는 DMU가 40개, 38개로 가장 많고 High-Tech에 속한 DMU는 16개로 가장 적게 나타났다.

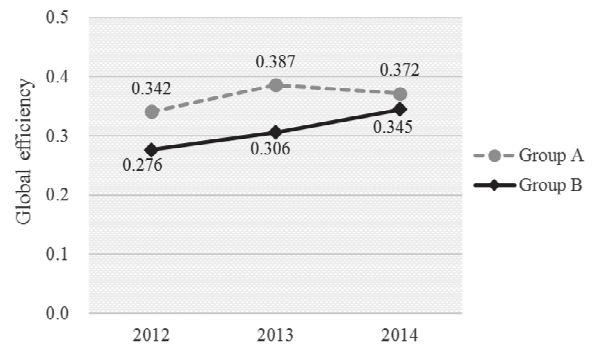
<Table 3> Technological Intensity Classification

Category	Industry	DMU
Low-Tech	Wood, pulp, paper, paper products; Printing and publishing; Food products; Beverages; Textiles & textile products; Leather and footwear	38
Medium-Low-Tech	Rubber and plastics products; Coke, refined petroleum products and nuclear fuel; Other non-metallic mineral products; Basic metals and fabricated metal products	22
Medium-High-Tech	Electrical machinery and apparatus; Motor vehicles, trailers and semi-trailers; Chemicals excluding pharmaceuticals; Railroad equipment and transport equipment; Machinery and equipment	40
High-Tech	Medical, precision and optical instruments; Electronic components, computer, radio, television and communication equipment and apparatuses	16
Total		118

4. 분석 결과

4.1 제조업 전반 혁신 효율성 및 생산성

2012~2014년 자료를 종합한 글로벌 프런티어를 기준으로, 글로벌 효율성은 프런티어와 DMU의 격차를 나타낸다. 분석 결과 <Figure 2>와 같이 전반적으로 내부 R&D만 수행한 Group A의 평균 글로벌 효율성이 외부 R&D도 함께 수행한 Group B에 비해 높게 나타났다. Group A의 경우 혁신 효율성이 2013년에 증가했다가 2014년에 다소 낮아진 반면 Group B는 효율성이 꾸준히 증가하였다.



<Figure 2> Global Efficiency, 2012~2014

각 시점마다 R&D 수행 유형(R&D type)에 따라 글로벌 효율성에 차이가 있는지를 검증하기 위해 독립성, 정규성 및 등분산성 검토 후 분산분석(ANOVA)을 수행한 결과는 <Table 4>와 같다. 2012, 2013년은 Group A와 Group B의 효율성 차이가 유의했으나 2014년에는 유의하지 않은 수준으로 그 차이가 줄어들었다. 이는 Group B의 효율성이 꾸준히 상승하고 Group A의 효율성은 다소 정체되어 두 그룹의 효율성 격차가 줄어들었기 때문이다.

<Table 4> ANOVA for Global Efficiency

Null Hypothesis	p-value	Decision
The distribution of <i>global efficiency</i> (2012) is the same across R&D type	0.035**	Reject
The distribution of <i>global efficiency</i> (2013) is the same across R&D type	0.024**	Reject
The distribution of <i>global efficiency</i> (2014) is the same across R&D type	0.241	Accept

** p < 0.05.

특히 글로벌 효율성이 높은 DMU들을 분석한 결과는 <Table 5>와 같다. 2012~2014년의 전 시점을 기준으로 글로벌 프런티어를 구성하는 6개의 DMU 중 2013년까지는 각 그룹마다 1개씩 프런티어를 구성하였고 2014년에

는 2개 모두 Group B에 속한 2개의 DMU만이 프런티어를 구성하였다. 또한 각 시점에서 글로벌 효율성이 가장 높은 상위 10개 DMU 분석 결과 2012, 2013년에는 3개만이 Group B에 속하였으나 2014년에는 7개로 그 비중이 대폭 상승하였다. 이렇듯 외부 R&D를 병행하는 Group B에서 매우 효율적인 DMU가 많아지고 평균 효율성이 높아지는 것으로 보아 외부 R&D의 활용이 혁신 효율성 향상에 긍정적인 영향을 미치고 있다고 할 수 있다.

<Table 5> Distribution of Outstanding Performers

Year	Group A	Group B
2012	7(1)	3(1)
2013	7(1)	3(1)
2014	3(0)	7(2)

Note : The number of DMUs on the global frontier at each period is indicated inside the bracket.

제 2.2절에서 언급된 바와 같이 생산성 변화는 프런티어 변화와 추격 효과로 나눌 수 있다. 프런티어 변화가 1보다 크면 t시점에 비해 t+1시점의 프런티어가 글로벌 프런티어에 가까워졌음을 의미하고 1보다 작으면 멀어졌음을 의미한다. 추격 효과가 1보다 크면 t시점에 비해 t+1시점에서 프런티어와 더 가까워졌음을 나타내며 1보다 작으면 멀어졌음을 의미한다.

생산성 변화 분석 결과 <Table 6>과 같이 Malmquist 생산성 지수의 평균은 전부 양의 값을 가지며 2012~2014년에 걸쳐 Group A와 Group B 모두 혁신 생산성이 증가한 것으로 나타났다. 2012~2013년에 Group A의 생산성 증가 효과가 24.97%로 Group B에 비해 다소 높았지만 2013~2014년에는 Group B의 생산성 증가가 36.66%로 월등히 높게 나타났다. 2012~2013년에 생산성 증가는 두 그룹 모

<Table 6> Malmquist Indices of Two R&D Types

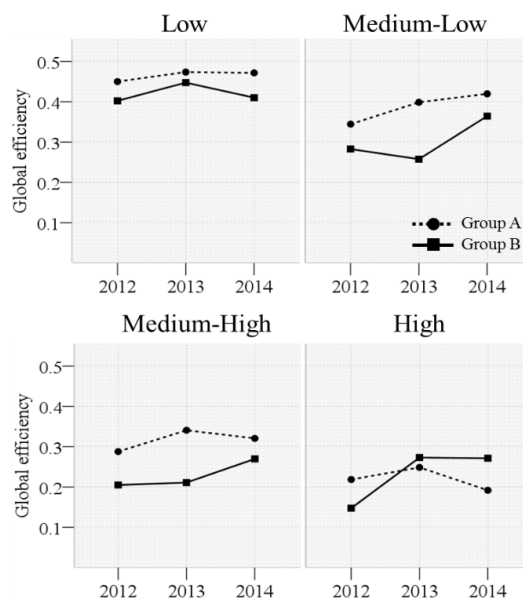
	Period			
	2012~2013		2013~2014	
	index	Δ%	index	Δ%
Malmquist productivity				
Group A	1.2497	24.97%	1.0716	7.16%
Group B	1.2265	22.65%	1.3666	36.66%
Catch-up effect				
Group A	0.9185	-8.15%	1.2325	23.25%
Group B	1.112	11.20%	1.4889	48.89%
Frontier-shift effect				
Group A	1.4897	48.97%	0.9811	-1.89%
Group B	1.5587	55.87%	1.0838	8.38%

Note : 'Δ%' represents the proportion of productivity change from t to t+1; Δ% = (index-1)×100(%)

두 프런티어가 확장되었기 때문이며 Group B는 55.87%의 상당한 프런티어 확장과 더불어 11.2%의 추격 효과를 보이며 효율성이 향상되었지만 Group A는 프런티어가 확장된 만큼 추격하지 못한 것으로 나타났다. 2013~2014년에는 강한 추격 효과로 인해 생산성이 두 그룹 모두 향상되었으며 프런티어가 다소 축소된 Group A에 비해 외부 R&D를 함께 수행한 Group B는 프런티어도 확장되어 전 기간에 걸쳐 프런티어가 확장되고 효율성이 증대된 것으로 나타났다.

4.2 산업 유형별 혁신 효율성 및 생산성 변화

기술집중도를 고려한 산업 유형 별 R&D 수행 유형에 따른 혁신 효율성을 <Figure 3>과 같이 도식화 하였다.



<Figure 3> Global Efficiencies in Four Technological Intensity Types, 2012~2014

내부 R&D만 수행한 Group A의 경우 Medium-Low-Tech를 제외한 모든 기술집중도 유형에서 글로벌 효율성이 낮아지거나 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 반면 내부와 외부 R&D를 모두 수행한 Group B의 경우 Low-Tech를 제외한 모든 유형에서 글로벌 효율성은 증가하고, Group A와의 효율성 격차는 2013년 이후 줄어들었다. 특히 High-Tech는 2013년 이후 Group B의 효율성이 Group A보다 더 향상되었다.

기술집중도 유형의 시점 별 R&D 수행 유형(R&D type)에 따른 글로벌 효율성 차이를 통계적으로 검증하기 위해 독립성, 정규성 및 등분산성 검토 후 분산분석(ANOVA)을 수행한 결과는 <Table 7>과 같다. Low-Tech은 전 시점에서 Group A의 효율성이 높지만 그 차이는 유의하지

않게 나타났다. Medium-Low-Tech의 경우 2013년 Group B의 효율성 낮아지고 Group A의 효율성은 증가하여 통계적으로 유의한 차이를 보였으나 2014년에 Group B의 효율성이 크게 향상되어 그 차이가 유의하지 않은 수준으로 줄어들었다. Medium-High-Tech은 2012~2013 기간에는 Group A의 효율성이 Group B보다 유의하게 높았으나 2014년에 Group A의 효율성은 감소하고 Group B의 효율성이 증가하며 그 격차가 유의하지 않은 수준까지 줄어들었다. High-Tech 역시 2012년 Group B의 효율성이 Group A보다 유의하게 낮았으나 2013~2014년에는 통계적으로 유의하지는 않으나 Group A의 효율성을 넘어섰으며 2013년 보다 2014년에 그 차이가 더 증가하였다. 이러한 사실로 비추어 볼 때 기술집중도가 높을수록 외부 R&D 활용의 효과가 더 크다고 할 수 있다.

<Table 7> ANOVA for Global Efficiency of Two R&D Types

Technological intensity category	Period	p-value	Decision
Low-Tech	2012	0.461	Accept
	2013	0.696	Accept
	2014	0.718	Accept
Medium-Low-Tech	2012	0.126	Accept
	2013	0.004***	Reject
	2014	0.316	Accept
Medium-High-Tech	2012	0.038**	Reject
	2013	0.009***	Reject
	2014	0.238	Accept
High-Tech	2012	0.061*	Reject
	2013	0.718	Accept
	2014	0.415	Accept

Note : Null hypothesis for all decision is ‘The distribution of global efficiency of ‘Technological intensity category’ in ‘Period’ is the same across R&D type’; * p < 0.1, ** p < 0.05, *** p < 0.01.

기술집중도에 따라 외부 R&D의 활용이 생산성 변화에 미치는 영향 또한 다르게 나타난다는 것을 생산성 변화의 원인 분석을 통해 확인할 수 있었으며 그 결과는 <Table 8>과 같다. Low-Tech는 2012~2014년에 걸쳐 Group A와 Group B모두에서 생산성이 증가했으며 2012~2013년에는 Group B의 생산성 향상이 더 컸으나 이후 기간에는 Group A의 생산성 향상이 더 두드러지게 나타났다. Medium-Low-Tech과 Medium-High-Tech는 2012~2013년 동안에 Group A의 생산성이 더 많이 향상되었고 이후 기간에는 Group B의 생산성이 월등히 많이 증가하였다. High-Tech는 전 시점에서 Group B의 생산성이 더 큰 폭으로 향상되어 외부 R&D 수행의 영향이 다른 유형보다 크다고 해석할 수 있다. High-Tech를 제외한 모든 기술집중도 유형에서는 2012~2013년 동안의 생산성 향상의 주요 원인은 프런티어 확장인 것으로 나타났으나 프런티어를 성공적으로 추격하지는 못한 것으로 분석되었다. 반면 High-Tech는 Group A와 Group B의 생산성 증가 원인이 다르게 나타났는데 Group B의 경우 약 44%의 프런티어 확장과 188.36%의 월등한 프런티어 추격 성과를 바탕으로 79.91%만큼의 생산성이 향상되었다. High-Tech를 제외한 세 가지 유형의 2013~2014년 동안의 생산성 증가는 추격 효과가 주요 원인이었으며 High-Tech는 프런티어 확장이 주요 원인으로 나타났다.

5. 결론 및 시사점

본 연구는 자체 R&D뿐만 아니라 외부와의 협업을 통한 R&D 수행이 중소기업에 어떠한 영향을 미치는지 국내 제조 산업을 대상으로 글로벌 Malmquist 생산성 분석 기법을 활용하여 실증적으로 분석하였다. 이와 함께 OECD가

<Table 8> Malmquist Indices of Four Technological Intensity Types

Technological intensity	Period	2012~2013		2013~2014	
	R&D type	Group A	Group B	Group A	Group B
Low-Tech	Malmquist productivity	15.33%	20.31%	17.11%	5.02%
	Catch-up effect	-6.36%	-10.26%	30.37%	11.49%
	Frontier-shift effect	40.35%	39.14%	8.27%	0.41%
Medium-Low-Tech	Malmquist productivity	26.45%	-1.61%	15.85%	47.48%
	Catch-up effect	-20.62%	-45.53%	22.41%	101.03%
	Frontier-shift effect	60.05%	86.60%	-5.74%	-20.46%
Medium-High-Tech	Malmquist productivity	31.75%	15.51%	1.70%	52.46%
	Catch-up effect	-10.52%	-6.24%	32.83%	71.93%
	Frontier-shift effect	57.16%	59.39%	-18.50%	23.03%
High-Tech	Malmquist productivity	19.26%	79.91%	-10.26%	36.88%
	Catch-up effect	0.25%	188.36%	-7.70%	1.70%
	Frontier-shift effect	37.95%	44.06%	16.30%	29.50%

제시한 산업별 혁신에 대한 집중 정도를 나타내는 기술집중도에 따라 R&D 수행 유형 간의 혁신 효율성과 생산성 변화 차이를 분석하였다. 본 연구의 실증적 분석 결과는 대기업에 비해 한정된 자원으로 혁신을 수행하는 중소기업에게 외부 R&D의 필요성을 제시하였다는 데에 그 의미가 있다.

본 연구의 주요 분석 결과는 크게 두 가지이다. 첫째, 외부 R&D를 활용한 경우의 혁신 효율성은 그렇지 않은 경우보다 전반적으로 낮게 나타났으나 지속적인 증가 추세를 보였다. 또한 시점 별로 효율성이 가장 높은 10개 DMU 중 외부 R&D를 수행한 경우가 차지하는 비중도 크게 증가하였다. 혁신 생산성 변화 측면에서도 외부 R&D를 수행한 경우의 혁신 생산성이 꾸준히 증가하였고 내부 R&D만 수행한 경우와 달리 전 시점에서 프런티어 확장 효과와 우수한 추격 효과를 보였다. 이러한 결과는 외부 R&D가 서로 다른 조직이나 기관의 협력을 요구하기 때문에 단기적으로는 비효율이 발생할 수 있지만 장기적 관점에서는 안정적으로 혁신 효율성 향상에 기여할 수 있다는 가능성을 보여준다. 이에 외부 R&D 도입을 통한 혁신의 빠른 정착을 위해서는 우선 중소기업에 대한 best practice를 발굴하고 공유하는 정책적 지원이 필요하며 외부 R&D 도입 및 협력에 관련된 표준화된 프로세스를 정비하고 개발하는 경영적 지원이 요구된다.

둘째, 외부 R&D 활용의 효과는 기술집중도에 따라 다르며 기술집중도가 높은 산업일수록 외부 R&D의 활용이 혁신 효율성에 긍정적인 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 혁신 생산성 변화도 기술집중도에 따라 다르게 나타났으며 특히 기술집중도가 매우 높은 High-Tech에서는 2013년 이후 내부 R&D만을 수행한 경우보다 효율성이 높아졌다. 이에 따라 원활한 외부 R&D 활용을 위해서는 기술집중도를 고려한 차별화된 접근이 요구된다. 예를 들어 기술집중도가 높은 기술주도형 중소기업은 혁신을 위한 재원이나 인력 등이 부족한 한계를 극복하기 위한 대안으로 적극적으로 외부 R&D의 도입을 고려할 수 있으며 이를 위해 우선 중소기업 중심의 산·학·연 협력 기반이 마련되어야 하며 활성화를 위해 다양한 R&D 과제를 발굴해야 한다.

6. 한계점 및 향후 연구

최근 Cruz-Cazares et al.[9], Guan and Chen[14] 등의 연구에서는 혁신을 R&D와 사업화 두 단계로 구분한 뒤 단계별 효율성과 통합적 관점에서의 효율성을 분석하였다. 이를 적용한다면 외부 R&D가 혁신 효율성에 미치는 영향에 대한 보다 체계적인 분석이 가능할 것으로 기대된다. 본 연구에서는 자료의 일관성 등을 고려하여 확보할 수

있었던 최대 시점인 3개 시점의 자료를 대상으로 분석하였으나 더 많은 시점에 걸친 자료를 이용한다면 보다 정확한 외부 R&D의 장기적 영향과 주기적인 패턴 등을 파악할 수 있을 것이며 추가적으로 기술집중도에 따라 외부 R&D의 효과가 다르게 나타나는 원인을 분석한다면 보다 폭넓은 이해가 가능할 것이다. 또한 본 연구에서는 분석 자료의 한계로 인해 time-lag을 고려하지 않았으나 보다 정확한 혁신 효율성 측정을 위해 향후 연구에서는 이에 대한 심도 있는 분석과 고찰이 필요하다. 나아가 Baek and Noh[2]의 연구와 같이 협력 개발, 기술 도입, 위탁 개발 등 다양한 외부 R&D 활용 방법을 고려하여 이에 따라 혁신 효율성이 어떻게 달라지는지 분석하고 기술집중도 외에 다른 혁신 특성들까지 고려한다면 혁신 효율성 향상을 위한 보다 구체적인 외부 R&D 활용 방안 도출할 수 있을 것으로 기대된다.

Acknowledgement

The empirical data used in this study was provided by a Korea Federation of SMEs(KBIZ), Korea.

References

- [1] Ahuja, G., Collaboration Networks, Structural Holes, and Innovation : A Longitudinal Study Gautam Ahuja, *Administrative Science Quarterly*, 2000, Vol. 45, No. 3, pp. 425-55.
- [2] Baek, C. and Noh, M., A Study on the contribution of firms' open innovation strategies to R&D efficiency, *Productivity Review*, 2013, Vol. 27, No. 4, pp. 302-19.
- [3] Banker, R.D., Charnes, A., and Cooper, W.W., Some Models for Estimating Technical and Scale Inefficiencies in Data Envelopment Analysis, *Management Science*, 1984, Vol. 30, No. 9, pp. 1078-92.
- [4] Berchicci, L., Towards an open R&D system : Internal R&D investment, external knowledge acquisition and innovative performance, *Research Policy*, 2013, Vol. 42, No. 1, pp. 117-27.
- [5] Brown, M.G. and Svenson, R.A., Measuring R&D Productivity, *Research-Technology Management*, 1988, Vol. 31, No. 4, pp. 11-5.
- [6] Caves, D.W., Christensen, L.R., and Erwin, D.W., The Economic Theory of Index Numbers and the Measurement of Input, Output, and Productivity, *Econometrica*, 1982, Vol. 50, No. 6, pp. 7393-1414.
- [7] Charnes, A., Cooper, W.W., and Rhodes, E., Measuring

- the efficiency of decision making units, *European Journal of Operational Research*, 1978, Vol. 2, No. 6, pp. 429-44.
- [8] Chesbrough, H.W., *Open Innovation : The New Imperative for Creating And Profiting from Technology*, Harvard Business School Press, 2003.
- [9] Cruz-Cazares, C., Bayona-Saez, C., and Garcia-Marco, T., You can't manage right what you can't measure well : Technological innovation efficiency, *Research Policy*, 2013, Vol. 42, No. 6-7, pp. 1239-50.
- [10] Czarnitzki, D., Ebersberger, B., and Fier, A., The relationship between R&D collaboration, subsidies and R&D performance : Empirical evidence from Finland and Germany, *Journal of Applied Econometrics*, 2007, Vol. 22, No. 7, pp. 1347-66.
- [11] Den Hertog, R.G.J., Determinants of internal and external R&D : Some Dutch evidence, *Economist*, 1993, Vol. 141, No. 2, pp. 279-89.
- [12] Fare, R., Grosskopf, S., Norris, M., and Zhang, Z., Productivity Growth, Technical Progress, and Efficiency Change in Industrialized Countries, *The American Economic Review*, 1994, Vol. 84, No. 1, pp. 66-83.
- [13] Grimpe, C. and Kaiser, U., Balancing Internal and External Knowledge Acquisition : The Gains and Pains from R&D Outsourcing, *Journal of Management Studies*, 2010, Vol. 47, No. 8, pp. 1483-509.
- [14] Guan, J. and Chen, K., Measuring the innovation production process : A cross-region empirical study of China's high-tech innovations, *Technovation*, 2010, Vol. 30, No. 5-6, pp. 348-58.
- [15] Guan, J., Zuo, K., Chen, K., and Yam, R.C.M., Does country-level R&D efficiency benefit from the collaboration network structure?, *Research Policy*, 2016, Vol. 45, No. 4, pp. 770-84.
- [16] Guan, J.C., Yam, R.C.M., Mok, C.K., and Ma, N., A study of the relationship between competitiveness and technological innovation capability based on DEA models, *European Journal of Operational Research*, 2006, Vol. 170, No. 3, pp. 971-86.
- [17] Gulati, R. and Singh, H., The Architecture of Cooperation : Managing Coordination Costs and Appropriation Concerns in Strategic Alliances, *Administrative Science Quarterly*, 1998, Vol. 43, No. 4, pp. 781-814.
- [18] Hagedoorn, J., Understanding the rationale of strategic technology partnering : Interorganizational modes of cooperation and sectoral differences, *Strategic Management Journal*, 1993, Vol. 14, No. 5, pp. 371-85.
- [19] Han, Y.J., The relationship between the main elements of internal and external R&D companies with corporate performance, *Journal of the Korea Management Engineers Society*, 2016, Vol. 21, No. 1, pp. 39-57.
- [20] Hashimoto, A. and Haneda, S., Measuring the change in R&D efficiency of the Japanese pharmaceutical industry, *Research Policy*, 2008, Vol. 37, No. 10, pp. 1829-1836.
- [21] Hatzichronoglou, T., *Revision of the High-Technology Sector and Product Classification*, OECD Science, Technology and Industry Working Papers, 1997.
- [22] Heidenreich, M., Innovation patterns and location of European low- and medium-technology industries, *Research Policy*, 2009, Vol. 38, No. 3, pp. 483-94.
- [23] Hollanders, H. and Celikel-Esser F., Measuring innovation efficiency, INNO-Metrics Themat Pap, 2007.
- [24] Hwang, J., Han, J.H., and Kang, H., The Impact of Innovative Collaboration on the Performance of Small and Medium Enterprises, *Journal of Korea Technology Innovation Society*, 2010, Vol. 13, No. 2, pp. 332-64.
- [25] Jeon, I. and Lee, H., Performance Evaluation of R&D Commercialization : A DEA-Based Three-Stage Model of R&D Performance, *Journal of Korean Institute of Industrial Engineers*, 2015, Vol. 41, No. 5, pp. 425-38.
- [26] Kaihua, C. and Mingting, K., Staged efficiency and its determinants of regional innovation systems : a two-step analytical procedure, *The Annals of Regional Science*, 2014, Vol. 52, No. 2, pp. 627-57.
- [27] Kim, H. and Yang, D., Study of the Determinants of R&D Cooperation : Empirical Evidence from Korean Manufacturing SMEs, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 2014, Vol. 15, No. 11, pp. 6587-98.
- [28] Kim, J.-H. and Park, J.-H., Open Technological Collaboration Performance in Korean Small and Medium Enterprises : Moderating Role of Environmental Complexity, *Journal of the Korean Production and Operations Management Society*, 2011, Vol. 22, No. 2, pp. 255-76.
- [29] Kim, Y.J., Technological Collaboration Linkages and the Innovation Output in Small and Medium-sized Firms : A Study on the Moderating Effects of Absorptive Capacity, *Korean Management Review*, 2005, Vol. 34, No. 5, pp. 1365-90.
- [30] Lee, C., Lee, K., and Pennings, J.M., Internal capa-

- bilities, external networks, and performance : a study on technology-based ventures, *Strategic Management Journal*, 2001, Vol. 22, No. 6-7, pp. 615-40.
- [31] Lee, H., Park, Y., and Choi, H., Comparative evaluation of performance of national R&D programs with heterogeneous objectives : A DEA approach, *European Journal of Operational Research*, 2009, Vol. 196, No. 3, pp. 847-55.
- [32] Lee, J., Small firms' innovation in two technological settings, *Research Policy*, 1995, Vol. 24, No. 3, pp. 391-401.
- [33] Lee, J.D. and Chung, Y.H., R&D Productivity Analysis of Small and Medium Sized Manufacturing Enterprises in Korea, *Accounting Information Review*, 2014, Vol. 32, No. 1, pp. 51-68.
- [34] Lee, S.K., Mogi, G., Lee, S.K., Hui, K.S., and Kim, J.W., Econometric analysis of the R&D performance in the national hydrogen energy technology development for measuring relative efficiency : The fuzzy AHP/DEA integrated model approach, *International Journal of Hydrogen Energy*, 2010, Vol. 35, No. 6, pp. 2236-46.
- [35] Liu, J.S. and Lu, W.M., DEA and ranking with the network-based approach : A case of R&D performance, *Omega*, 2010, Vol. 38, No. 6, pp. 453-64.
- [36] Love, J.H. and Mansury, M.A., External linkages, R&D and innovation performance in US business services, *Industry and Innovation*, 2007, Vol. 14, No. 5, pp. 477-96.
- [37] Lu, W. and Liu, T., Malmquist indices of R&D productivity growth in taiwanese IC-design industry, *Global Journal of Business Research*, 2010, Vol. 4, No. 1, pp. 105-14.
- [38] Min, H.-K., Kim, T.-Y., and Hwang, S.-J., Open Innovation R&D Efficiency Evaluation by Integrated AHP-DEA, *Journal of Society of Korea Industrial and Systems Engineering*, 2012, Vol. 35, No. 4, pp. 149-61.
- [39] Moon, H.Y. and Chang, S.J., A Study on the Effect of Innovation Performance Through Business Innovation Activities and Techniques for the Small and Medium Size Company, *Journal of the Korean Society for Quality Management*, 2015, Vol. 43, No. 2, pp. 151-68.
- [40] Nasierowski, W. and Arcelus, F.J., On the efficiency of national innovation systems, *Socio-Economic Planning Sciences*, 2003, Vol. 37, No. 3, pp. 215-34.
- [41] Pastor, J.T. and Lovell, C.A.K., A global Malmquist productivity index, *Economics Letters*, 2005, Vol. 88, No. 2, pp. 266-271.
- [42] Pavitt, K., Sectoral patterns of technical change : Towards a taxonomy and a theory, *Research Policy*, 1984, Vol. 13, No. 6, pp. 343-73.
- [43] Piga, C.A. and Vivarelli, M., Internal and External R&D : A Sample Selection Approach, *Oxford Bulletin of Economics and Statistics*, 2004, Vol. 66, No. 4, pp. 457-82.
- [44] Powell, W.W., Koput, K.W., and Smith-doerr, L., Inter-organizational Collaboration and the Locus of Innovation : Networks of Learning in Biotechnology, *Administrative Science Quarterly*, 1996, Vol. 41, No. 1, pp. 116-45.
- [45] Rothwell, R., External networking and innovation in small and medium-sized manufacturing firms in Europe, *Technovation*, 1991, Vol. 11, No. 2, pp. 93-112.
- [46] Santamaria, L., Nieto, M.J., and Barge-Gil, A., Beyond formal R&D : Taking advantage of other sources of innovation in low- and medium-technology industries, *Research Policy*, 2009, Vol. 38, No. 3, pp. 507-17.
- [47] Shaw, B., Networking as an Innovation Strategy, In : *Innovation Strategies : Theoretical Approaches-Experiences-Improvements*, Amsterdam : Elsevier, 1992, pp. 127-40.
- [48] Shin, J.K. and Im, C.H., Cross Functional Cooperation, External Network, R&D Efficiency, and Firm Profitability, *Journal of Human Resource Management Research*, 2009, Vol. 16, No. 2, pp. 197-212.
- [49] Tsai, K. and Wang, J., Inward technology licensing and firm performance : a longitudinal study, *R&D Management*, 2007, Vol. 37, No. 2, pp. 151-60.
- [50] Tsai, K.-H. and Wang, J.-C., External technology acquisition and firm performance : A longitudinal study, *Journal of Business Venturing*, 2008, Vol. 23, No. 1, pp. 91-112.
- [51] Tsai, K.-H. and Wang, J.-C., External technology sourcing and innovation performance in LMT sectors : An analysis based on the Taiwanese Technological Innovation Survey, *Research Policy*, 2009, Vol. 38, No. 3, pp. 518-26.
- [52] Tsai, K.-H., Hsieh, M.-H., and Hultink, E.J., External technology acquisition and product innovativeness : The moderating roles of R&D investment and configurational context, *Journal of Engineering and Technology Management*, 2011, Vol. 28, No. 3, pp. 184-200.
- [53] Wang, E.C. and Huang, W., Relative efficiency of R&D activities : A cross-country study accounting for envi-

ronmental factors in the DEA approach, *Research Policy*, 2007, Vol. 36, No. 2, pp. 260-73.

- [54] Yang, D.-W. and Kim, D.-J., Causal Relationship between Firms' R&D Collaboration and Performance in Contents Industry, *The Journal of the Korea Contents Association*, 2010, Vol. 10, No. 4, pp. 306-16.
- [55] Yuan, P., Chen, Q., and Hu, R., Dynamic Change of Region Innovation Performance in China : An Analysis of Malmquist Index, *Science of Science and Management of S.&T.*, 2007.
- [56] Zhong, W., Yuan, W., Li, S.X., and Huang, Z., The performance evaluation of regional R&D investments in China : An application of DEA based on the first official China economic census data, *Omega*, 2011, Vol. 39, No. 4, pp. 447-55.

ORCID

Jiyoung Lee | <http://orcid.org/0000-0002-2105-8178>

Chulyeon Kim | <http://orcid.org/0000-0001-9000-1725>

Gyunghyun Choi | <http://orcid.org/0000-0002-6586-0525>