

# 계량 서지정보를 이용한 지식구조 분석방법 및 연구관리에 관한 연구동향 : 정부출연연구소 사례를 중심으로\*

정우성<sup>1</sup> · 양현채<sup>2†</sup>

<sup>1</sup>포항공과대학교 산업경영공학과/물리학과, <sup>2</sup>포항공과대학교 기술경영대학원

## Knowledge Structures and Research Management based on Bibliographic Analysis : A Case of Government-funded Research Institutes in Korea

Woo-Sung Jung<sup>1</sup> · Hyeonchae Yang<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Industrial and Management Engineering/Department of Physics,  
Pohang University of Science and Technology

<sup>2</sup>Graduate Program for Technology Innovation and Management,  
Pohang University of Science and Technology

### ■ Abstract ■

As research management is growing in importance for research organizations, their disciplinary structures need to be interpreted. However, it is not only difficult but ambiguous to detect causal relations between subjects because diverse disciplines interacting with each other lead the development of organizational research. Therefore, this article summarizes the major concepts and results recently achieved in the related fields such as research management, bibliographic analysis, information theory, and networks to characterize organizational knowledge structures. Relevant analytical methods obtained from the literature can be applied to empirical situations. Predictive causal relations can be measured using an information theoretic indicator on a series of organizational research portfolios identified from bibliographic information. A network approach would be suitable to manage organizational research effort from a holistic view. Knowledge structures of the Government-funded Research Institutes in Korea are explored experimentally.

Keywords : Thematic Causality, Research Portfolio, Research Management, Transfer Entropy, Causality Network

논문접수일 : 2015년 09월 30일 논문게재확정일 : 2015년 11월 18일

논문수정일(1차 : 2015년 11월 13일)

\* 본 연구는 한국연구재단을 통해 미래창조과학부의 이공분야기초연구사업으로부터 지원받아 수행되었습니다(NRF-2013R1A2A2A04017095).

† 교신저자, [wsjung@postech.ac.kr](mailto:wsjung@postech.ac.kr)

## 1. 서 론

조직환경이 매우 급격하게 변화하는 가운데 새로운 지식생산은 조직이 경쟁에서 우위를 지니게 하는 중요한 요소로 꼽히고 있다[76]. 이와 관련하여 Beinhocker[9]는 지식을 부의 원천으로 경제가 진화한다고 주장했다. 따라서 조직은 환경변화에 대응하여 내부적으로 새로운 지식을 생산할 수 있는 능력을 갖출 필요가 있다. 이러한 능력을 갖추기 위해서는 하위 조직의 연구능력을 파악[36]하거나 연구개발과 관련한 다양한 활동을 추적관찰[16]하는 등의 노력을 기울일 수 있다. 그러나 기본적으로 지식은 정제되어 있는 것이 아니라 개발 환경과 용도에 따라 변화하는 것으로 관리가 쉽지 않은 문제가 있다. 연구자들은 지식생산을 독립적 활동이 아닌 지식전파, 교환, 및 순환 등으로 이루어진 동적 과정으로 이해하고 있다[23, 76].

이러한 동태적 특성에 기초하여 지식의 발전은 복잡계(complex system)의 관점에서 해석되곤 한다[10, 51, 77]. 학문, 연구자, 연구기관과 같이 지식발전에 기여하는 다양한 참가자들이 시스템을 구성하는 개체로 인식되고 있다. 그리고 개체들의 상호작용으로 과학기술이 발전하거나 혁신적 기술이 개발되기도 한다. 또한 시스템의 결과물은 다시 미래의 시스템 발전을 위한 원동력이 되어 신제품 개발, 효율성 향상 혹은 인적자원 육성을 가능케 하는 반복적 특성도 있다. 한편 Fleming and Sorenson [29]은 새로운 지식은 기존의 지식을 재조합하여 생성된다고 언급하기도 했다. 서로 다른 요소들을 합성하여 시너지(synergy) 효과를 낼 수 있기 때문이다. 그러나 지식간 상호의존이 강화될수록 유용한 지식조합을 찾는 일은 점점 어려워진다[29]. 따라서 조직의 가용 지식을 확인하고, 조합가능한 지식을 찾아내는 일이 더욱 강조된다.

효과적 지식관리 방안을 도출하기 위해서는 조직의 과거 성과로부터 지식구조의 특성을 파악하는 것이 타당할 것이다. 그러나 다양한 개체들이 복잡한 상호작용을 통해 발전하는 지식 시스템에서 개

체간 관계를 규명하는 것조차 어려운 일이다. 이에 본 논문에서는 관련연구를 중심으로 연구기관의 지식구조 추적방법을 모색하려고 한다. 구체적으로 조직의 연구영역을 식별하기 위해 통계자료와 분류 시스템을 이용할 필요가 있으며, 연구영역 간 영향력을 수치화하기 위해 통계적으로 유의한 선후관계를 추출하는 방안이 마련되어야 할 것이다. 나아가 연구조직이 활동하는 전체 연구영역에 대해 운영능력을 확보할 필요가 있으므로 연구영역 간 선후관계를 조합하여 관리에 활용할 수 있는 방법을 모색하려고 한다. 결과적으로 기관의 지식발전 경로를 정량적으로 밝힐 수 있고, 각 영역 사이의 영향력을 가능할 수 있을 것이다. 그리고 선행연구에서 얻은 지식구조 추출방법을 우리나라 정부출연연구소(출연연) 사례에 적용하여 기관의 연구운영 능력을 향상을 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제 2장에서는 연구기관이 보유한 지식구조를 정량적으로 파악하기 위해 관련된 분야의 연구를 소개한다. 제 3장에서는 선행연구에서 다루었던 주요 방법을 실증자료에 적용하기 위해 사용된 연구방법과 결과를 설명한다. 제 4장에서 본 논문의 요약 및 의의를 제시하며 결론을 맺는다.

## 2. 주요 연구 테마

### 2.1 연구 영향평가(Impact Assessment)

최근 연구 효율성 향상이나 책임성(accountability) 증명에 대한 요구가 늘어나면서 연구평가에 대한 관심이 증가하고 있다. 금융위기와 같은 외부환경 변화가 과학발전에 지대한 영향을 미침에 따라[22, 46] 연구 영향평가 및 관리는 중요성을 더해가고 있다[8]. 연구평가는 연구의 질을 측정하거나 연구의 투입(input), 산출(output) 및 영향(impact)을 평가하는 과학적 활동이다[57]. 이를 위해 각종 서지정보 지표와 동료 평가(peer review)를 포함한 정량적 혹은 정성적 방법이 활용되고 있다. 대표적 사례로

출판량과 같은 성과지표를 기초로 공공연구를 평가하는 영국의 연구실적평가(Research Assessment Exercise)를 들 수 있다. 투입은 연구에 투자한 인적, 물리적, 재정적 몰입도를 나타내고, 연구 산출은 연구성과의 질을 측정하는 지표이다. 그리고 연구 투입 대비 성과에 대한 지표인 연구 효율성 및 생산성도 연구평가에서 다룬다[57].

평가대상은 과학적 지식의 진보와 사회경제적 이익에 대한 기여를 의미하는 연구의 효과까지도 포함한다[62]. 특히 과거에는 공공연구기관의 성과는 주로 경제적 효과를 기준으로 판단했으나 최근에는 과학적 진보에 대한 기여 등으로 평가영역을 확대하고 있다[56]. 경제적 효과만을 고려한다면 블루스카이 연구(blue skies research)와 관련한 학문 및 주제는 평가 절하될 수 있기 때문이다. 학계에서는 연구의 관리 및 효율성 증진을 목표로 다양한 연구가 수행되고 있다[60]. 따라서 우수한 연구기관은 지속적으로 새로운 지식을 생산하며 주변 연구조직과 긴밀한 협력을 이루어 효율적인 연구개발 프로세스를 구축하는 조직이라는 인식이 확산되고 있다. 이와 관련하여 Morillo et al.[59]는 외부기관과 협력이 활발한 연구기관일수록 연구성과도 우수함을 밝혀냈다. 또한 연구의 경제적 잠재성을 이용하는 특허, 기술기반 스피노프(spin-off), 위탁연구, 컨설팅과 같은 상용화 활동이 평가지표로 사용되기도 한다[63].

연구평가는 과거연구 성과의 장단점을 이해함으로써 향후 연구계획을 수립하는데 도움을 줄 수 있어야 할 것이다. 그러나 연구자들은 과학적 영향력을 측정하는 다양한 지표가 개발되고 있음에도 불구하고 객관성이나 실효성은 여전히 의문이라고 지적하고 있다[63, 88]. 따라서 연구 영향평가에서 사용하는 방법을 통해 기관의 학문적 발전경로를 객관적 방법으로 측정하거나 효율적 운영에 대한 실증적 함의를 얻기에는 어려움이 따를 수 있다. 또한 기관이 보유한 지식구조에 대한 이해가 선행되어야 하고, 다양한 자료가 축적되어야 하지만 이에 대한 연구가 부족한 실정도 어려움을 가중한다.

## 2.2 연구 포트폴리오 분석

1970, 80년대 사업 포트폴리오 계획이 기업의 전략을 수립하는데 활용되어 왔듯이 1990년대 들어 연구 포트폴리오 분석 역시 조직의 전략수립에 중요한 분석도구로 강조되기 시작했다[19, 70]. 과학과 혁신이 불러오는 효과는 매우 크지만 그 성공을 예측하기 어렵고 소수의 성과에서 막대한 수익이 발생하는 특징이 있기 때문에 단일 연구 수준에서 나아가 전체적 관점에서 연구를 바라볼 필요성이 제기되었다. 그리고 레이저와 같이 성공적 아이디어는 최초의 발견과는 거리가 먼 분야에서 응용이 이루어진 경우가 빈번한 것도 연구 포트폴리오 분석이 필요한 이유이다. 더욱이 최근 들어 기술발전의 가속화로 경쟁이 심화되고 기술 생명주기 또한 단축되는 등의 환경변화가 원인이 되기도 한다[16]. 과학기술이 조직의 경쟁우위 창출에 더욱 중요한 역할을 하기 때문이다. 따라서 연구 포트폴리오를 분석함으로써 조직의 핵심역량[67]을 파악할 수 있고, 연구방향을 설정[18]할 수 있다.

더불어 연구 포트폴리오 관리[19]는 조직 운영에 요구되는 새로운 지식과 역량을 발전시키는데 필수적 요소로 자리잡고 있다. 연구 포트폴리오 관리란 지원이 필요한 여러 연구 주제에 대한 평가에서부터 우선순위 설정, 투자결정, 중단에 이르기까지 다양한 활동을 포함하는 전략적 의사결정 프로세스를 의미한다. 연구개발이 조직의 전략 및 목표 달성에 핵심적인 역할을 하기 때문이다[16]. Floricel and Ibanescu[30]는 기술이 급격하게 변하는 환경에 놓인 조직일수록 상이한 연구를 서로 결합하기 위해 포트폴리오 수준에서의 관리를 선호한다고 주장한다.

포트폴리오 관리는 기본적으로 동태적 의사결정 과정이다. 관리 대상인 연구가 처한 환경 및 상태가 지속적으로 변화하기 때문이다. 또한 한 영역의 발전이 다른 분야의 발전을 촉진할 수도 반대로 지연시킬 수도 있다. 기관의 성격에 따라서 연구 포트폴리오의 구성에도 차이가 있다. 기술적 성공은 공공연구기관과 사설연구기관 모두 중시하는 요소

이나 공공연구기관은 지식전파를 더욱 강조하는 반면 사설기관은 시장의 변화에 따라 영향을 받는다[50]. 이 외에도 이해관계자들의 요구사항에 대응하기 위해 연구 스펙트럼의 구성에 변화가 있기도 하다. 그리고 장·단기 연구 사이에서 최적의 조합을 찾고 있기도 하며 지식 생산 혹은 응용의 구성에 대해서도 고려할 필요가 있다[61]. 이와 같이 포트폴리오에 대한 의사결정은 불확실성, 정보 가변성, 학문간 상호의존성 등의 어려움이 있지만[19] 포트폴리오를 관리하여 연구로 인해 발생할 수 있는 효과를 최대화할 필요가 있다.

나아가 최근 학계에서는 연구 포트폴리오에 대한 조정능력을 확립하는데 관심을 기울이고 있다[64]. 급변하는 외부 환경에 적응해가면서도 조직의 연구 성과(outcomes)를 증진하기 위한 다양한 시도가 포함된다. 협력 연구와 같이 연구와 관련한 네트워크를 효율적으로 다루어 조직관계를 유연하게 관리하려는 노력을 예로 들 수 있겠다[86]. 이는 연구 포트폴리오 관리를 조직의 동적 역량(dynamic capabilities)의 구성요소로 간주하기 때문이다. Teece et al. [80]이 말하는 조직의 동적 역량은 급격한 환경변화에 대응하여 조직의 내·외부 역량을 효과적으로 재구성하고 통합할 수 있는 능력을 일컫는다. 즉, 동적 역량을 갖춘 조직은 격변하는 환경에서 기회를 신속하게 포착하여 가용자원을 적절하게 변형하여 시스템적 관점에서 문제를 해결할 수 있다. 그리고 연구 포트폴리오의 조정능력을 확보한 조직은 연구개발을 조정하여 조직 내부의 관행과 프로세스를 변화시키는 전략적 수단으로까지 활용할 수 있을 것이다[21, 44]. 그러나 현재 포트폴리오 거버넌스에 대한 개념이 정립 중에 있어 세련화의 과제를 안고 있으며[64], 실제 연구 포트폴리오 운영에 관한 지침을 획득하기 위해서는 다양한 실증분석이 필요한 실정이다. 이를 위해 Hassan and Haddawy [37]이 지적하였듯 동태적 흐름에 기초한 지식구조를 이해할 필요가 있다. 조직의 학습 혹은 협력 등을 통해 획득한 지식은 가치창출에 매우 중요한 원천이기 때문이다. 이와 같이 지식 흐름을 이해함으

로써 조직이 이용할 수 있는 기술적 능력과 장·단점을 확인할 수 있고[18, 85], 학문간 지식확산의 패턴을 밝혀낼 수도 있다[84]. 또한 지식구조의 특성을 파악하는데 논문이나 특허의 서지정보와 같은 실증 자료가 활용되기도 한다[18].

### 2.3 계량서지정보(Bibliometrics) 분석

계량서지정보 분석은 과학적 성과물을 정량적으로 측정하고 분석하는 활동[39]을 의미한다. 최근 WoS (Web of Science) 혹은 Scopus와 같은 학술정보 데이터베이스에 대한 접근이 용이해지고 전산처리 능력이 향상되면서 연구평가를 위한 기초자료로 보다 널리 활용되고 있다. 1960년대 De Solla Price and Weber[24]가 학술지로 과학적 성장을 설명한 이후 본격적으로 서지정보 분석이 수행되기 시작하고 1979년 과학인용색인(Science Citation Index, SCDI)[32]이 소개되면서 과학적 성과지표로 주목을 받기 시작한다. 2000년대 들어 연구평가와 순위선정에 대한 관심이 증가하여 서지정보가 더욱 널리 활용되고 있는 추세이다. 대표적인 예로 라이덴 순위(Leiden ranking), 상하이 교통대학에서 발표하는 세계대학랭킹(Academic Ranking of World Universities, ARWU) 등이 있다. 또한 2005년에 소개된 h-지수[41]는 논문 생산성과 영향력을 동시에 평가하는 지표로 널리 알려져 있다. 앞서 소개한 방법이 주로 논문 수, 인용 빈도와 같은 수량적 분석이라면 과학 시스템을 구성하는 다양한 개체들 사이의 상호작용과 연관관계를 측정하는 관계형 지표[17]도 활발하게 이용되고 있다. 공동 저자, 국가 동시 출현, 동시인용 등이 관계형 지표의 예라고 할 수 있겠다[3].

그러나 최근에는 연구 영향력 측정을 위해 결정론적 지표 외에도 통계적 접근법에 대한 요구도 증가하고 있다. 과학기술 발전은 다양한 개체들이 복잡한 상호작용을 거쳐 발전하므로 유일한 해가 존재한다는 가정으로 영향력을 수량화하는 결정론적 지표보다 통계적 방법이 더욱 적합할 수 있다. 예

를 들어 문헌의 인용정보를 활용하여 성과를 그룹화하고 연구 그룹의 발전을 추적관찰 할 수 있다 [26, 75]. 또한 통계적 신뢰성, 확률적 오차 및 신뢰구간 등에 대한 정보도 제공할 수 있으므로 수학적 해석이 가능하다. 기대값과 확률을 측정할 수 있으므로 미래 예측에도 활용될 가능성이 높다. 통계적 접근을 활용한 대표적인 예로 과학지도(map of science)를 들 수 있다. 과학지도는 과학을 세부 영역으로 분할하고, 이들 간의 관계를 보여주는 것이 일반적 형태이다[47]. 19세기 초반에 August Comte가 과학을 여섯 개 분야로 분류하고, 계층구조를 밝힌 것을 과학지도의 기원으로 삼고 있으나 최근에는 축적된 서지정보와 향상된 정보처리능력에 힘입어 보다 정교한 과학지도가 소개되고 있다[11, 52, 66].

서지정보 중 인용 혹은 공저자는 가장 널리 활용되는 자료 중 하나로 네트워크 구조를 채택하여 학문간 혹은 연구자간 정보이동을 표현하기도 한다 [7, 49, 84]. 서지정보에 포함된 연구자 및 이들의 소속을 통해 기관 혹은 국가 간 정보이동을 가능하는 연구도 수행되었다[14]. Trajtenberg[81]이 제안한 특허인용 분석은 지식과 기술의 흐름을 설명하는 도구로 유용성을 인정받고 있다. 또한 Fairclough and Thelwall[27]은 피인용 횟수와 같은 정보가 과학적 성공을 표현하는 간접 지표이긴 하지만 비교적 객관적 방법으로 측정할 수 있는 장점이 있다고 언급했다. 하지만 인용정보는 출판이 이루어진 후 이용이 되기까지 시간이 걸리는 단점도 있다[27]. 그리고 인용이나 공저자정보는 기관이나 부서와 같이 한정된 범위에서 이동하는 정보를 추적하기에 어려움이 따른다. 물론 기관 내부에서 수행되는 세미나 혹은 회의를 통해 정보가 이동할 가능성이 높으나 그 양을 산정하기 어려운 문제가 있다. 대신 논문 출판량을 통해 어떤 영역에서 연구가 활발하게 수행되고 있는지를 판단할 수 있으므로[57] 논문 생산량의 변화를 이용한다면 시간차를 두고 발전하는 두 학문의 연관성을 살펴 볼 수 있을 것이다. 따라서 본 논문에서는 논문 생산량 변화를 이용하여 기관이 보유한 연구 포트폴리오 구성요소 간의

정보이동을 추정하려 한다.

## 2.4 인과성 예측(Predictive Causality)

실증자료를 이용하여 하위 시스템들이 보유한 상관관계를 추정하는 것은 널리 사용되고 있는 방법이다. 인과성 예측(predictive causality)[83]은 하위 시스템이 보유한 관계를 밝히는 방법의 하나로, 두 하위 시스템이 보유한 시계열(time series) 자료로 두 시스템의 시간적 관계를 추정한다. 변수 X와 Y가 주어졌을 때, 변수 Y의 과거값만을 사용하여  $Y_{t+1}$ 을 예측하고, 변수 X와 Y의 과거 값을 모두 포함하여  $Y_{t+1}$ 을 예측할 수 있을 것이다. 이 때 두 번째 방법이 변수 Y의 값에만 의존한 첫 번째 방법에 비해  $Y_{t+1}$ 에 대한 예측력이 향상된다면 변수 X는 변수 Y에 인과적 관계를 갖는다고 한다. 이 개념은 수학자 Wiener[83]에 의해 처음 소개되었고, 경제학자 Granger[34]가 실증자료에 활용한 이후 시계열 분석에서 널리 활용되고 있다. Bressler and Seth[12]은 인과성 지표는 어떤 변수가 다른 변수에 행사하는 방향성이 있는 영향력을 표현한다고 언급했다.

시스템에 존재하는 인과성은 두 가지 방법으로 추정할 수 있다[5]. 확인적 접근(confirmatory approach)과 탐색적 접근(exploratory approach)이 그것이다. 확인적 접근은 어떤 인과성 모델이 미리 주어지고, 실증자료를 이용해 이 모델의 타당성을 측정하는 것이다[1]. 이에 반해 주어진 자료의 인과적 연관성의 방향을 추론하는 것은 탐색적 방법에 속한다. 이 방법은 데이터를 기반으로 하므로 인과적 연관성에 대한 가정이 거의 없다. 과학 및 자연현상과 같이 여러 하위 시스템으로 구성되어 있는 복잡계에서는 개체들이 비선형적 상호작용을 하므로 인과관계를 직관적으로 이해하기 어렵다는 문제가 있다[12]. 복잡계는 확률적 시스템이므로 내, 외부 영향이 명확히 구분되는 결정적 시스템과는 차이가 있다. 오히려 상호작용이 가능한 두 하위 시스템의 시간적 동태성에 주목해 관계를 통계적으로

표현하는 것이 자연스럽다[42]. 따라서 복잡계에서 인과적 관계를 추정하기 위해서는 탐색적 접근이 적합할 것이다.

복잡계에서 인과적 관계를 예측하는 대표적 방법으로 전이 엔트로피(transfer entropy)가 있다. 전이 엔트로피는 정보이론(information theory)을 이용한 인과성 예측방법으로 Granger 모형이 예측가능성의 증가로 인과성을 표현한다면, 전이 엔트로피에서는 불확실성의 감소로 예측력 향상을 나타낸다[38]. 정보이론은 변수 X와 Y의 관계를 확률적으로 표현함으로써 두 변수 사이에 공유하는 정보의 특성 등을 수치화 할 수 있다. 또한 전이 엔트로피를 이용해 인과성을 추정할 때 확률분포로부터 획득한 다변량 엔트로피 추산만 필요할 뿐 모델 정의가 필요하지 않다는 장점이 있다. 모델 기반의 인과성 예측은 계산이 용이하긴 하지만 모델 정의에 오류가 있을 경우 하위 시스템의 상호작용을 제대로 이해할 수 없다. 또한 Abdul Razak and Jensen [5]은 전이 엔트로피가 집단행동과 같은 비선형성을 특징으로 하는 복잡계에서 인과성을 예측하는데 매우 적합한 지표라고 보고했고, 선형·비선형 혹은 재귀적 상호작용을 하는 개체들 간의 관계를 감지하는 능력이 탁월하다고도 주장했다. 전이 엔트로피는 온라인 네트워크[78], 주식시장[48, 55], 기후 네트워크[43]의 인과적 관계를 분석하는데 활용되었다.

Schreiber[71]는 전이 엔트로피를 다음과 같이 정의했다.

$$TE(X \rightarrow Y) = \sum_{y_{t+1}, y_t^n, x_t^m} p(y_{t+1}, y_t^n, x_t^m) \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \log \left( \frac{p(y_{t+1}|y_t^n, x_t^m)}{p(y_{t+1}|y_t^n)} \right) \\ & = H(y_{t+1}|y_t^n) - H(y_{t+1}|y_t^n, x_t^m) \quad (2) \end{aligned}$$

$x_t^m = \{x_t, \dots, x_{t-m+1}\}$  과  $y_t^n = \{y_t, \dots, y_{t-n+1}\}$  은 각각 변수 X와 Y에서의 값이고,  $m$ 과  $n$ 은 자료의 길이를 의미한다. 식 (1)은 전이 엔트로피의 일반적 표현형으로 로그의 밑은 정보의 단위이다. 함수  $H$ 는

확률변수의 불확실성을 의미하는 Shannon 엔트로피[74]를 의미하고 식 (2)는 전이 엔트로피가 인과성 예측을 나타낼 수 있음을 보여준다. 즉, 전이 엔트로피는  $y_{t+1}$ 를 예측하기 위해  $y_t^n$ 만이 주어졌을 때에 비해  $y_t^n$ 와  $x_t^m$ 가 주어졌을 때 감소된 불확실성을 나타낸다. 획득한 전이 엔트로피의 통계적 유의성은 무작위 셔플링(shuffling)을 통해 생성한 X 데이터를 이용해 평가하고, 적절한 유의수준에서 단측 z-검정을 실시한다[15, 53, 82].

## 2.5 네트워크 효과성(Network Effectiveness)

최근 개별 개체들로는 해결하기 어려운 복잡한 문제를 총체적으로 다루기 위해 네트워크라는 접근을 활용하고 있다. 네트워크는 결점(node)과 연결(link)의 집합으로 구성된다. 연구 네트워크에서는 연구자, 논문, 연구기관, 혹은 국가 등 독립적인 개체가 결점이 될 수 있으며 개체들간 상호작용이 연결을 형성한다. 네트워크 접근은 기술과 같은 환경 변화에 높은 유연성이 요구되고 개체들간 다양성이 높은 시스템을 관리하기에 적합하다고 알려져 있다[33]. 연구 네트워크의 경우, 연결을 통해 교환된 지식 및 정보는 개체들이 더욱 향상된 성과를 이룩하는데 활용될 수 있고, 효율적 네트워크는 실패 가능성은 줄어드는 반면 혁신 가능성은 높이는 효과를 기대할 수 있다[59]. 또한 Beaver[7]는 개체들이 네트워크에 참여함으로써 연구 자금을 지원받을 가능성이 더 높아지거나 연구 스펙트럼이 확장되는 등의 혜택을 누린다고 분석했다.

혁신을 촉진하기 위해서는 네트워크의 효율적 운영능력은 필수적이라 할 수 있겠다[65, 90]. 즉, 네트워크가 효율적으로 목표를 달성했는지 여부에 따라서 네트워크의 성과가 결정될 것이다. 이를 네트워크의 효과성이라고 한다. 여기서 목표란 주로 네트워크를 구성하는 개체들이 공통적으로 보유하는 네트워크 수준에서의 성취를 의미한다[54, 69]. 물론 네트워크의 성과(outcome)를 정확히 측정하기란 어려운 일이다[68]. 그렇지만 다양한 지표들

을 활용해 성과를 가늠할 수 있다. 가령 연구 네트워크는 특허 수, 피인용 수, 신제품 판매량 등과 같은 지표로 전체의 성과를 추정하기도 한다[20]. 네트워크의 성과는 운영전략에 따라서 달라지기도 하고, 네트워크 구조적 특성의 영향을 받기도 한다. 그러나 연구자들은 개체들 간에 복잡하게 얽혀 있는 관계를 관리하기 위한 구체적인 방법에 대한 논의를 여전히 진행하고 있다[4, 7].

네트워크의 효과적인 운영을 위해 구조적 효율성을 증진하기 위한 다양한 방안이 제시되고 있다. 연구 네트워크의 효율적 구조는 개체간 지식교환을 촉진시켜 혁신의 성과에 영향을 미칠 수 있기 때문이다. 새로운 연결을 추가함으로써 네트워크의 집중도를 높여 효과성을 향상시키는 방법을 제안하기도 한다[28, 35]. 그러나 최근 Enemark et al.[25]는 실험을 통해 네트워크의 구조적 변화가 집단행동을 촉진시킬 수도 있지만 반대로 저하시킬 수도 있다고 발표함으로써 네트워크 설계에 대한 중요성을 다시 일깨워 주었다. 하지만 연구자들은 효과적인 운영을 위한 네트워크 구조에 대해서 이견을 내놓고 있어 혼란이 빚어지고 있기도 하다. 가령 네트워크의 불안정성은 변화를 위한 기회라고 여겨지기도 하지만[40] 어느 정도의 안정성은 네트워크를 유지하는데 필수적이라고도 주장한다[58]. 그리고 네트워크 규모 측면에서, 결점이 증가하면 관리에 요구되는 복잡도가 증가하지만, Kickert et al.[45]은 새로운 개체가 추가되면 오히려 제어가 수월해 질 수 있다고 주장했다. 또 다른 예로, Provan and Lemaire [68]은 네트워크의 연결 집중도가 상승할수록 효과적인 운영이 가능하다고 주장했지만, 하위 그룹을 적절히 배치하여 그룹간 결속을 다지는 매개자를 이용하는 방법이 정보를 이동에 효율적이라는 주장도 있다[13, 79].

이렇듯 효율적 네트워크 운영에 대한 다양한 주장은 각 시스템에 맞게 개선방향을 설정해야 함을 의미한다. Pittaway et al.[65]도 지적하였듯, 네트워크 구조를 설계할 때, 네트워크 고유의 특성을 이해할 필요가 있다. 따라서 실증자료 분석을 통해 네

트워크의 구조적 특성과 장단점에 대한 이해를 바탕으로 발전 방향을 제시하는 것이 타당할 것이다. 특히 본 논문에서는 과거 연구기관이 생산한 지식을 네트워크로 표현해 구조적 특성을 밝히고 효율적 운영방안을 모색하려 한다. 네트워크는 다양한 영역에 걸친 연구분야를 전체적 관점에서 검토할 수 있게 도와주는 도구이기 때문이다. 그리고 연구 포트폴리오에 등장하는 다양한 학문들간 발전의 선후관계를 연결로 표현한다. 따라서 본 논문에서 획득한 네트워크 분석 결과는 연구기관의 연구 포트폴리오 관리능력 향상을 위해 보다 실증적 방향을 제시해 줄 수 있을 것이다.

### 3. 연구기관의 지식구조 분석방법

본 절에서는 앞서 관련연구에서 얻은 함의를 실증자료에 적용하기 위한 연구 인과관계 네트워크의 구성과 분석방법에 대해 설명한다. 논문 서지정보를 바탕으로 하위 연구기관의 연구영역을 식별하고, 이를 토대로 연구기관의 포트폴리오에서 학문간 인과관계를 측정한다. 그리고 추출한 인과관계를 조합하여 네트워크를 생성해 전체 연구기관 수준에서 구조를 분석한다. 한국의 정부출연연구소 사례를 채택하여 지식구조를 살펴보려 한다.

#### 3.1 자료수집 및 연구 포트폴리오 식별

본 절에서는 연구기관에서 발간된 논문 서지정보를 하위 연구기관 및 학문 별로 분류하는 방법을 설명한다. 객관적 기준에서 연구영역을 선별하기 위해 통계자료를 활용할 필요가 있고, 이 자료에 공통기준을 적용해야 비교분석을 통해 기관의 특징적 연구분야를 선별할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 논문 서지정보라는 통계자료와 지식지도라는 공통 분류기준을 활용하여 기관의 연구 포트폴리오를 추적했다. 연구기관에서 지난 18년(1995~2012) 동안 출판된 서지정보는 WoS를 통해 수집하고, 하위 연구기관에서 발표한 연구결과는 저자의 소속정보

및 주소정보를 이용해 식별한다. 그리고 연구기관이 보유한 연구 포트폴리오를 추출하기 위해 UCSD 과학지도[11]라는 분류 시스템을 활용한다. 공통의 기준으로 기관의 연구영역을 식별하기 위해서이다. 이 시스템은 입력한 서지정보의 학술지명을 기준으로 두 개의 계층으로 구성된 학문구조에 연결한다. 그 결과로 각 서지정보는 13개 상위학문에 속한 554개의 세부학문 중 하나에 대응된다. 참고로 본 논문은 연구의 연속성을 보장하기 위해 최소 20편의 논문이 출판된 하위분야만을 포트폴리오 분석에 포함했다.

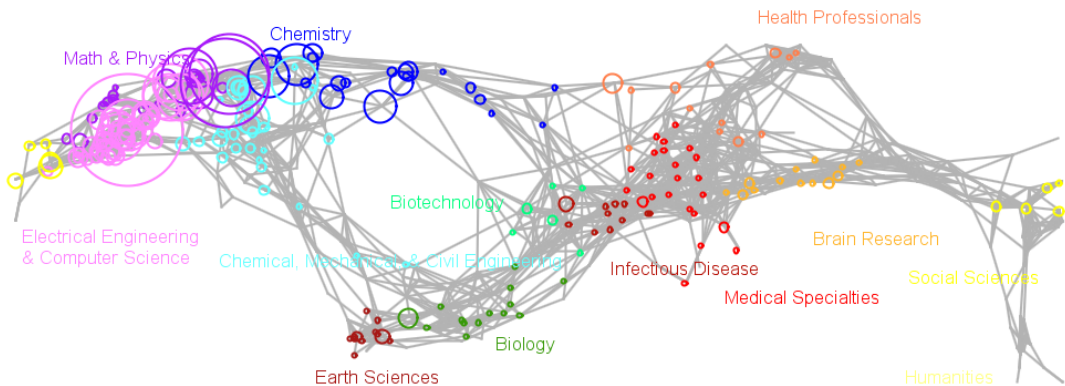
자료 수집 결과, 본 분석에는 26개 출연연의 포트폴리오를 식별하는데 총 59,333편의 논문이 사용되었다. [그림 1]은 서지정보 분석 도구인 Sci2[72]를 이용하여 한국전자통신연구원의 연구 포트폴리오를 시각화한 것이다. 또한 시간의 흐름에 따른 연구발전을 살펴보기 위해 연구 포트폴리오를 3년 단위로 분할한다. 따라서 본 분석에 등장하는 하위 연구기관은 최대 연속한 6개 포트폴리오를 보유하고 있다.

하위 연구기관의 연구 포트폴리오에 내재한 학문간 인과적 관련성을 측정하는데 전이 엔트로피를 사용한다. 즉, 인과성은 세부학문 X와 Y에서의 논문출판량의 현시 비교우위 지수(Revealed Comparative Advantage)[6] 값을 이용해 측정한다. 각 분야에서 논문 생산성의 우위를 판단하기 위해 대표적

공공연구기관인 독일의 막스플랑크 연구협회(Max-Planck-Gesellschaft), 미국 에너지성(DOE : Department of Energy) 산하 연방연구소(National Laboratory)의 성과를 비교대상으로 삼는다. 연구개발은 주로 바로 이전에 생산된 연구결과에 영향을 받는 연속적 특징이 있으므로[51] 시간상 인접한 두 연구 포트폴리오 사이에 학문간 정보 이동을 측정하는 것이 적합하다. 그리고 산출한 전이 엔트로피의 통계적 유의성을 평가하기 위해 유의수준 5%에서 단측 z-검정을 실시한다. 분석결과는 조직이 보유한 독특한 지식구조와 발전과정을 보여줄 수 있을 것이다.

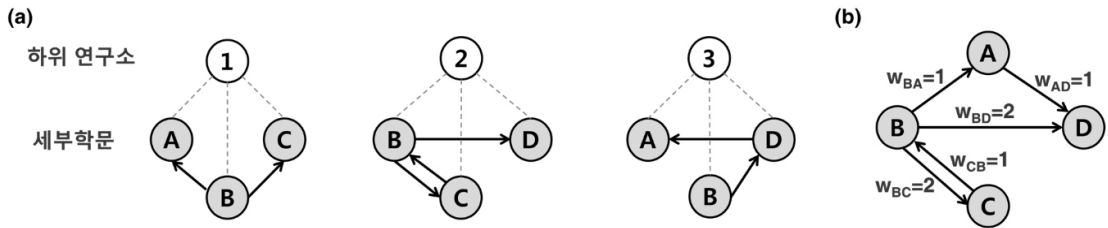
### 3.2 인과관계 네트워크 구성 및 구조적 특성

연구기관은 출연연과 같이 대개 여러 하위연구조직으로 구성되어 있다. 개별 하위기관은 전문 연구영역을 보유하고 있어 이를 중심으로 연구 포트폴리오를 구축하는데 주력하고 있다. 이러한 하위기관 내부에서는 연구의 방법이나 정보가 공유될 기회가 더 많을 것이다. 따라서 개별 하위 연구소에 얽힌 학문간 관계를 조합하여 전체 연구조직 수준에서 지식구조를 분석하기 위해 [그림 2]의 예시와 같이 네트워크를 활용한다. [그림 2]의 (a)는 숫자로 표시된 세 개의 하위연구소들이 보유한 학문간 인과관계 구조의 예이다. 본 분석은 26개 출연



[그림 1] 한국전자통신연구원의 연구 포트폴리오(1995~2012)





[그림 2] 연구소 인과관계 네트워크 구성 예

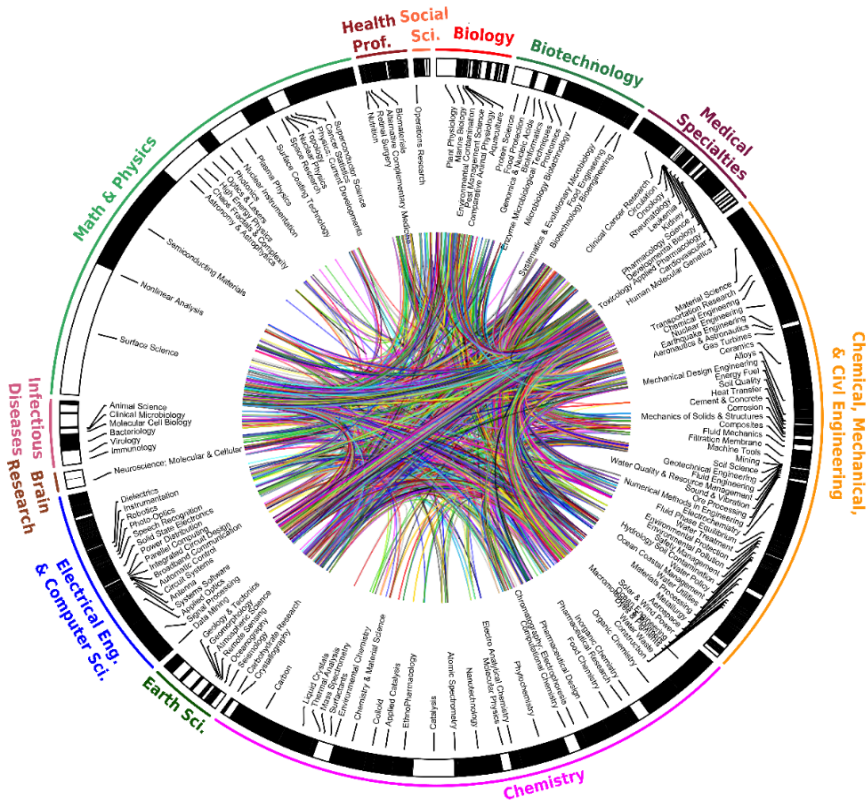
연을 대상으로 하고 있으므로, 숫자로 표기된 하위 연구소란 한국전자통신연구원 혹은 한국전기연구원 등과 같은 개별 출연연이 될 것이다. 학문은 알파벳으로 표기되었고, 이들 사이의 인과관계는 실선의 화살표로 나타내었다. 결과적으로 세 개의 인과관계 네트워크를 추출할 수 있다. 그러나 연구 포트폴리오는 전체 기관 수준에서 관리되어야 할 필요가 있으므로 본 논문에서는 개별 네트워크를 하나로 병합하여 구조를 분석하려 한다. 그 방법으로서 개별 포트폴리오에 얽힌 인과관계를 모아 [그림 2]의 (b)와 같이 하나의 네트워크로 구성한다. 이 네트워크에서 가중치는 해당 인과관계의 출현 빈도를 의미한다. 결과적으로 본 논문에서는 [그림 2]의 (b)와 같은 가중 방향성 네트워크를 분석한다. 즉, 네트워크를 구성하는 결점은 연구 포트폴리오를 구성하는 세부학문이고, 연결은 학문간 인과관계에 해당한다. 또한 결점의 강도(strength)는 해당 결점에 연결된 가중치의 합으로 정의한다. 따라서 본 연구에서는 [그림 2]의 (b)와 같은 방법으로 네트워크를 생성하여 모든 출연연이 보유한 인과관계를 전체적 관점에서 분석한다.

[그림 2]의 (b)와 같은 방법으로 병합한 네트워크의 구조적 특성을 파악하기 위해 다양한 지표를 이용할 수 있다. 대표적 예로 결점 수(N)와 연결 수(E)를 이용해 네트워크의 규모를 가늠할 수 있다. 네트워크 밀도(density)는 학문들 사이에 인과관계가 밀접하게 연결된 정도( $D = E/N(N-1)$ )를 수치화 한다. 군집계수(clustering coefficient)는 특정 결점과 이웃한 결점들이 서로 연결되어 있을 확률을 의미한다. 또한 결점의 중요성을 측정하기 위해

가장 널리 사용되는 지표로 중심성(centrality)[31]을 들 수 있다. 중심성은 연결 중심성(degree centrality), 매개 중심성(betweenness centrality), 근접 중심성(closeness centrality)이 주로 사용 된다. 연결 중심성은 한 결점이 다른 결점과 연결된 정도를 나타내고, 매개 중심성은 한 결점이 네트워크에서 서로 다른 결점들을 연결시키는 역할을 하는 정도이다. 근접 중심성은 결점이 네트워크에서 다른 모든 결점들에 근접해 있는 정도를 의미한다. 그리고 본 논문에서는 네트워크 수준에서 연결성향을 파악하기 위해 이러한 중심성 지표들이 특정 결점을 중심으로 집중화 되어 있는 수준인 집중도[73]를 측정한다.

### 3.3 연구기관의 연구 인과관계 네트워크

본 절에서 설명하는 네트워크는 출연연의 연구 포트폴리오에서 추출한 인과관계를 조합하여 구성했고, 학문간 인과관계는 [그림 3]과 같이 도식화할 수 있다. 원형 그래프[87]의 테두리는 각 13개 상위 학문에서 출판된 논문의 수에 비례하여 길이가 결정된다. 흑백의 띠는 해당 세부학문에서의 비교우위를 나타낸다. 즉, 논문 생산량에서 비교우위가 있는 영역인 경우 검은색을 띠고 그렇지 않은 경우 흰색으로 표시되었다. 그리고 정보 이동이 추정된 두 학문 사이에는 연결선이 존재한다. 의학분야(Medical Specialties)를 예로 든다면, 이 분야는 출연연의 논문 생산성을 기준으로 중위권인 5위로 집계되어 원의 호가 출판량 1위인 화학(Chemistry) 분야에 비해 짧다. 하지만 의학분야는 출연연 전체



[그림 3] 정부출연연구소의 학문간 인과관계

연구에서 두 번째로 많은 연구 인과관계에 얽혀 있으므로 가장 안쪽 패널에서 확인할 수 있듯 연구 인과관계의 연결이 매우 조밀하다.

<표 1> 정부출연연구소의 학문간 인과관계 네트워크 속성

속성	값
결점 수	270
연결 수	4,130
최대 도수	133
밀도	0.057
군집계수	0.281
연결 중심성 집중도	0.195
매개 중심성 집중도	0.035
근접 중심성 집중도	0.309

연구기관이 보유한 학문간 인과관계 네트워크의 구조적 특성은 <표 1>과 같이 수치화할 수 있다.

화학분야에 속한 크로마토그래피 및 전기영동(Chromatography; Electrophoresis)이 가장 많은 유출(outbound) 연결을 보유하고, 수학 및 물리학(Math and Physics)의 최신 동향(Physics: Current Developments)을 다루는 분야에서 다수의 유입(inbound) 연결을 측정했다. 단, 본 논문에서 결점 수가 많다는 것이 반드시 논문의 생산량이 높다는 것을 의미하지는 않음을 지적한다. 본 논문에서는 시간 차이를 두고 발전의 연관성을 보유한 학문 간에 정보이동을 측정하기 때문이다. 그리고 결점 수에 비해 네트워크 지름은 적은 값을 갖는다. 이를 통해 학문들이 매우 밀접한 영향을 미치며 발전하고 있다는 것을 알 수 있다. 또한 네트워크의 군집계수를 통해 세 학문 사이에 인과관계의 순환을 측정할 수 있었다. 이러한 경우 세 분야의 순차적 발전 보다는 같은 시기에 동시에 발전할 가능성이 크다고 볼

수 있겠다. 본 분석에서는 인접한 두 시간대에 두 학문 사이의 정보 이동을 측정했기 때문이다. 즉, 동시에 발전하는 학문들은 연구 계획 수립 시, 함께 고려될 가능성이 높음을 시사한다. 또한 연결 중심성 집중도는 다수의 연결을 보유한 학문에 급진적 연구정책이 시행될 경우 그 여파가 이웃한 학문에까지 전달될 가능성이 높다는 것을 의미한다. 그리고 근접 중심성의 값이 다른 중심성 값에 비해 매우 큰 것으로 미루어 다른 중심성 지표보다 여러 학문에 접근가능성이 높은 학문이 네트워크 구조에 미치는 영향이 더 클 것이다. 즉, 여러 학문에 접근성이 높은 학문 위주로 연구정책을 시행한다면 보다 효과적으로 목적을 달성할 수 있을 것으로 짐작한다. 마지막으로 매개 중심성은 다른 지표들 보다 집중도가 낮아 연구 네트워크에 미치는 영향을 적을 것으로 예상할 수 있으나 매개 중심성이 높은 학문들의 중요성을 간과할 수는 없을 것이다. 만약 매개 중심성이 높은 학문들이 제대로 기능하지 못한다면 출연연 연구 네트워크는 여러 조각으로 분리될 가능성이 높기 때문이다.

#### 4. 요약 및 결론

본 논문은 연구기관에 내재한 지식구조의 특성을 밝히기 위해 관련분야의 연구결과와 주요 연구방법을 살펴보았다. 여러 분야에서 과학적 성과를 측정하고 지식구조의 특성을 밝히고자 노력하고 있지만 해결해야 할 많은 문제를 안고 있었다. 기본적으로 과학 시스템은 다양한 학문이 복잡한 상호작용을 통해 진화하고 있어 이 시스템에 존재하는 관계를 파악하는 것조차 어렵기 때문이다. 이에 기관이 배출한 연구업적을 기초로 연구영역 식별과 연구영향을 평가할 수 있는 주요방법을 소개하였다. 그리고 기관의 지식구조를 파악하기 위해 학문들 사이에 얽혀 있는 선후관계 측정방법에 대해서도 살펴보았다. 특히 이 관계를 전이 엔트로피를 이용하여 예측한다면 시간차를 두고 발전의 궤를 함께 하는 학문 조합을 추출할 수 있을 것이다. 또한 다

양한 분야에 걸쳐 수행되고 있는 연구를 총체적으로 관리하기 위한 도구로서 네트워크의 활용방안을 검토했다.

선행 연구에서 사용한 주요방법을 실증자료인 출연연 사례에 시범적으로 적용했다. 실증자료로서 우리나라 출연연의 연구 산출물을 사용했고, 출연연의 발전을 이끈 학문들 사이 선후 관계를 측정했다. 하위연구기관의 발전에 관련되어 있는 여러 학문들 사이의 관계를 종합하여 네트워크로 표현할 수 있었다. 지식 네트워크의 구조분석 결과에 따르면 출연연의 연구발전은 화학분야의 발전에 큰 영향을 받았고, 최신 물리학이 다른 학문의 발전에 뒤따르는 것으로 드러났다. 이는 사용한 지표가 변화가 갖는 역동성에 주목하기 때문에 출연연의 최신 연구발전에 숨은 주역과 수혜자를 가려낼 수 있었다. 만약 논문 생산량에만 관심을 두었다면 출연연에서 논문 생산성에서 가장 큰 비중을 차지하는 지질학(Geology) 분야를 무시했을 것이다. 그러나 오랫동안 비교우위를 점하고 있는 안정적 분야는 동태적 특성을 측정하기 어려워 본 논문에서는 큰 의미를 갖지 못했다. 따라서 정보이론의 지표가 신홍 연구영역을 중심으로 발전의 선후관계를 추적하는데 적합하다는 것을 알 수 있다. 나아가 본 연구에서 사용한 방법은 비단 출연연뿐 아니라 다양한 연구기관 사례에 적용하여 내부 지식의 발전을 평가하고, 기관의 학문발전에 대한 특징을 파악할 수 있을 것이다. 이는 향후 연구로 남겨 놓았다.

기술적 능력은 조직의 경쟁력을 강화하는데 기여하므로 연구의 발전방향을 관측하고 조정할 수 있는 능력이 요구된다. 학문의 발전경로를 파악하기 위해 비선형적 상호작용을 포착할 수 있는 지표를 활용할 필요가 있겠다. 또한 다양한 분야에 걸쳐 수행되고 있는 연구를 총체적으로 관리하기 위한 도구로서 네트워크를 도입해볼 수 있다. 네트워크 접근은 공공연구기관과 같이 규모가 큰 조직의 연구관리에도 새로운 방안을 제시할 수 있을 것이다. 가령 출연연 네트워크에서 연결 중심성의 집중도가 큰 학문에 급진적 연구정책이 시행될 경우 그 여파

가 이웃한 학문에까지 전달될 가능성이 높다는 것을 의미한다. 이와 같이 연구기관의 인과관계 구조를 이해함으로써 새로운 정책이 네트워크에 미칠 영향을 예측할 수 있고, 허브 학문과 같이 네트워크에서 의미가 있는 지점에 차별화된 관리를 계획할 수 있을 것이다.

## 참 고 문 헌

- [1] 박윤서, “서비스품질과 고객만족간의 인과관계 실증 분석”, 『한국경영과학회지』, 제36권, 제4호(2011), pp.143-160.
- [2] 박철순, “개방형 혁신 네트워크의 동태적 모형”, 『한국경영과학회지』, 제40권, 제1호(2015), pp.5-19.
- [3] 유경옥, 김향미, 김재욱, “연결망 분석을 이용한 마케팅 분야의 고객가치 연구의 진화 및 발전과정에 관한 연구”, 『한국경영과학회지』, 제38권, 제2호(2013), pp.1-24.
- [4] 정치영, 이재영, “SNA 기반 네트워크 파워를 이용한 지상전장정보체계 전투력 효과측정 모델제안”, 『한국경영과학회지』, 제36권, 제4호(2011), pp.1-16.
- [5] Abdul Razak, F. and H.J. Jensen, “Quantifying ‘Causality’ in Complex Systems : Understanding Transfer Entropy,” *PLoS ONE*, Vol.9, No.6(2014), e99462.
- [6] Balassa, B., “Trade Liberalisation and ‘Revealed,’ Comparative Advantage,” *The Manchester School*, Vol.33, No.2(1965), pp.99-123.
- [7] Beaver, D.D., “Reflections on Scientific Collaboration (and its study) : Past, Present, and Future,” *Scientometrics*, Vol.52, No.3(2001), pp.365-377.
- [8] Beerkens, M., “Facts and fads in academic research management : The effect of management practices on research productivity in Australia,” *Research Policy*, Vol.42, No.9 (2013), pp.1679-1693.
- [9] Beinhooker, E.D., *The Origin of Wealth : Evolution, Complexity, and the Radical Re-making of Economics*, Harvard Business School Press, 2006.
- [10] Bonifati, G., “‘More is different’, exaptation and uncertainty : three foundational concepts for a complexity theory of innovation,” *Economics of Innovation and New Technology*, Vol.19, No.8(2010), pp.743-760.
- [11] Borner, K., R. Klavans, M. Patek, A.M. Zoss, J.R. Biberstine, R.P. Light, V. Lariviere, and K.W. Boyack, “Design and update of a classification system : the UCSD map of science,” *PLoS ONE*, Vol.7, No.7(2012), e39464.
- [12] Bressler, S.L. and A.K. Seth, “Wiener-Granger causality : a well established methodology,” *Neuroimage*, Vol.58, No.2(2011), pp.323-329.
- [13] Burt, R.S., “Structural Holes and Good Ideas,” *American Journal of Sociology*, Vol.110, No.2(2004), pp.349-399.
- [14] Cantner, U. and B. Rake, “International research networks in pharmaceuticals : Structure and dynamics,” *Research Policy*, Vol.43, No.2(2014), pp.333-348.
- [15] Chávez, M., J. Martinerie, and M. Le Van Quyen, “Statistical assessment of nonlinear causality : application to epileptic EEG signals,” *Journal of Neuroscience Methods*, Vol.124, No.2(2003), pp.113-128.
- [16] Chiesa, V., F. Frattini, V. Lazzarotti, and R. Manzini, “Designing a performance measurement system for the research activities : A reference framework and an empirical study,” *Journal of Engineering and Technology Management*, Vol.25, No.3(2008), pp. 213-226.

- [17] Cobo, M.J., A.G. Lopez-Herrera, E. Herrera-Viedma, and F. Herrera, "Science Mapping Software Tools : Review, Analysis, and Cooperative Study Among Tools," *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, Vol.62, No.7(2011), pp.1382-1402.
- [18] Coombs, R., "Core competencies and the strategic management of R&D," *R&D Management*, Vol.26, No.4(1996), pp.345-355.
- [19] Cooper, R., "New product portfolio management : practices and performance," *Journal of Product Innovation Management*, Vol.16, No.4(1999), pp.333-351.
- [20] Council, N.R., *Industrial Research and Innovation Indicators : Report of a Workshop*, The National Academies Press, Washington, DC, 1997.
- [21] Crawford, L. and A.H. Nahmias, "Competencies for managing change," *International Journal of Project Management*, Vol.28, No.4 (2010), pp.405-412.
- [22] Cunningham, P., "Policy : Set research priorities in a time of recession," *Nature*, Vol.502 (2013), pp.433-434.
- [23] D'Ippolito, B., M. Miozzo, and D. Consoli, "Knowledge systematisation, reconfiguration and the organisation of firms and industry : The case of design," *Research Policy*, Vol.43, No.8(2014), pp.1334-1352.
- [24] De Solla Price, D.J. and L. Weber, "Science since Babylon," *Physics Today*, Vol.14(1961), p.46.
- [25] Érdi, P., K. Makovi, Z. Somogyi, K. Strandburg, J. Tobochnik, P. Volf, and L. Zolányi, "Prediction of emerging technologies based on analysis of the US patent citation network," *Scientometrics*, Vol.95, No.1(2012), pp.225-242.
- [26] Enemark, D., M.D. McCubbins, and N. Weller, "Knowledge and networks : An experimental test of how network knowledge affects coordination," *Social Networks*, Vol.36(2014), pp.122-133.
- [27] Fairclough, R. and M. Thelwall, "National research impact indicators from Mendeley readers," *Journal of Informetrics*, Vol.9, No.4 (2015), pp.845-859.
- [28] Ferligoj, A., L. Kronegger, F. Mali, T.A.B. Snijders, and P. Doreian, "Scientific collaboration dynamics in a national scientific system," *Scientometrics*, Vol.104, No.3(2015), pp.985-1012.
- [29] Fleming, L. and O. Sorenson, "Technology as a complex adaptive system : evidence from patent data," *Research Policy*, Vol.30, No.7 (2001), pp.1019-1039.
- [30] Floricel, S. and M. Ibanescu, "Using R&D portfolio management to deal with dynamic risk," *R&D Management*, Vol.38, No.5(2008), pp.452-467.
- [31] Freeman, L.C., D. Roeder, and R.R. Mulholland, "Centrality in social networks : II. Experimental results," *Social Networks*, Vol.2, No.2(1979), pp.119-141.
- [32] Garfield, E. and R.K. Merton, "Citation indexing : Its theory and application in science, technology, and humanities," Wiley New York, 1979.
- [33] Goldsmith, S. and W.D. Eggers, *Governing By Network : The New Shape of The Public Sector*, Brookings Institution Press, 2004.
- [34] Granger, C.W.J., "Investigating Causal Relations By Econometric Models and Cross-Spectral Methods," *Econometrica*, Vol.37, No.3(1969), p.424.

- [35] Hanaki, N., R. Nakajima, and Y. Ogura, "The Dynamics of R&D Network In The It Industry," *Research Policy*, Vol.39, No.3(2010), pp.386-399.
- [36] Harvey, J., A. Pettigrew, and E. Ferlie, "The Determinants of Research Group Performance : Towards Mode 2?," *Journal of Management Studies*, Vol.39, No.6(2002), pp.747-774.
- [37] Hassan, S.U. and P. Haddawy, "Analyzing Knowledge Flows of Scientific Literature Through Semantic Links : A Case Study In The Field Of Energy," *Scientometrics*, Vol. 103, No.1(2015), pp.33-46.
- [38] He, S., X. Zheng, D. Zeng, K., Cui, Z. Zhang, and C. Luo, "Identifying Peer Influence In Online Social Networks Using Transfer Entropy," In *Intelligence and Security Informatics*, G.A. Wang, X. Zheng, M. Chau and H. Chen Eds. Springer Berlin Heidelberg, 2013, pp.47-61.
- [39] Hess, D.J., "Science Studies : An Advanced Introduction," Nyu Press, 1997.
- [40] Hicklin, A., "Network Stability : Opportunity or Obstacles?," *Public Organization Review*, Vol.4, No.2(2004), pp.121-133.
- [41] Hirsch, J.E., "An Index To Quantify An Individual's Scientific Research Output," *Proc Natl Acad Sci USA*, Vol.102, No.46(2005), pp.16569-16572.
- [42] Hlavackovaschindler, K., M. Palus, M. Vejmelka, and J. Bhattacharya, "Causality Detection Based On Information-Theoretic Approaches In Time Series Analysis," *Physics Reports*, Vol.441, No.1(2007), pp.1-46.
- [43] Hlinka, J., D. Hartman, M. Vejmelka, J. Runge, N. Marwan, J. Kurths, and M. Paluš, "Reliability of Inference of Directed Climate Networks Using Conditional Mutual Information," *Entropy*, Vol.15, No.6(2013), pp.2023-2045.
- [44] Hornstein, H.A., "The Integration Of Project Management and Organizational Change Management Is Now A Necessity," *International Journal of Project Management*, Vol.33, No. 2(2015), pp.291-298.
- [45] Kickert, W.J.M., E.H. Klijn, and J.F.M. Koppenjan, *Managing Complex Networks : Strategies For The Public Sector*, Sage Publications. 1997.
- [46] Kim, S.Y., "Government R&D Funding In Economic Downturns : Testing The Varieties of Capitalism Conjecture," *Science and Public Policy*, Vol.41, No.1(2013), pp.107-118.
- [47] Klavans, R. and K.W. Boyack, "Toward A Consensus Map of Science," *Journal of The American Society For Information Science and Technology*, Vol.60, No.3(2009), pp.455-476.
- [48] Kwon, O. and J.S. Yang, "Information Flow Between Stock Indices," *Epl(Europhysics Letters)*, Vol.82, No.6(2008), p.68003.
- [49] Lee, D.H., I.W. Seo, H.C. Choe, and H.D. Kim, "Collaboration Network Patterns and Research Performance : The Case of Korean Public Research Institutions," *Scientometrics*, Vol.91, No.3(2012), pp.925-942.
- [50] Lee, M. and K. Om, "Different Factors Considered In Project Selection At Public and Private R&D Institutes," *Technovation*, Vol. 16, No.6(1996), pp.271-275.
- [51] Leydesdorff, L. and I. Rafols, "A Global Map of Science Based on The Isi Subject Categories," *Journal of The American Society For Information Science and Technology*, Vol.60, No.2(2009), pp.348-362.

- [52] Leydesdorff, L., "Statistics For The Dynamic Analysis of Scientometric Data : The Evolution of The Sciences In Terms of Trajectories and Regimes," *Scientometrics*, Vol.96, No.3(2013), pp.731-741.
- [53] Lizier, J.T., J. Heinzle, A. Horstmann, J.D. Haynes, and M. Prokopenko, "Multivariate Information-Theoretic Measures Reveal Directed Information Structure and Task Relevant Changes In Fmri Connectivity," *J Comput Neurosci*, Vol.30, No.1(2011), pp.85-107.
- [54] Möller, K. and A. Rajala, "Rise of Strategic Nets-New Modes of Value Creation," *Industrial Marketing Management*, Vol.36, No.7 (2007), pp.895-908.
- [55] Marschinski, R. and H. Kantz, "Analysing The Information Flow Between Financial Time Series," *The European Physical Journal B*, Vol.30, No.2(2002), pp.275-281.
- [56] Mirabeau, L., J. Kinder, and S. Malherbe, "Archetypes of Governance For Science and Technology Labs," *Technology Analysis and Strategic Management*, Vol.27, No.1(2014), pp.54-72.
- [57] Moed, H.F. and G. Halevi, "Multidimensional Assessment of Scholarly Research Impact," *Journal of The Association For Information Science and Technology*, Vol.66, No.10(2015), pp.1988-2002.
- [58] Morgan, D.L., M.B. Neal, and P. Carder, "The Stability of Core and Peripheral Networks Over Time," *Social Networks*, Vol.19, No.1 (1997), pp.9-25.
- [59] Morillo, F., A.A. Díaz-Faes, B. González-Albo, and L. Moreno, "Do Networking Centres Perform Better? An Exploratory Analysis In Psychiatry and Gastroenterology/Hepatology In Spain," *Scientometrics*, Vol.98, No.2 (2013), pp.1401-1416.
- [60] Morris, N., "The Developing Role of Departments," *Research Policy*, Vol.31, No.5(2002), pp.817-833.
- [61] Oecd, *Governance of Public Research : Toward Better Practices*, Paris, 2003.
- [62] Penfield, T., M.J. Baker, R. Scoble, and M.C. Wykes, "Assessment, Evaluations, and Definitions of Research Impact : A Review," *Research Evaluation*, Vol.23, No.1(2013), pp. 21-32.
- [63] Perkmann, M., R. Fini, J.-M. Ross, A. Salter, C. Silvestri, and V. Tartari, "Accounting For Universities' Impact : Using Augmented Data To Measure Academic Engagement and Commercialization by Academic Scientists," *Research Evaluation*, Vol.24, No.4(2015), pp. 380-391.
- [64] Pitsis, T.S., S. Sankaran, S. Gudergan, and S.R. Clegg, "Governing Projects Under Complexity : Theory and Practice In Project Management," *International Journal of Project Management*, Vol.32, No.8(2014), pp.1285-1290.
- [65] Pittaway, L., M. Robertson, K. Munir, D. Denyer, and A. Neely, "Networking and Innovation : A Systematic Review of The Evidence," *International Journal of Management Reviews*, Vol.5-6, No.3-4(2004), pp.137-168.
- [66] Porter, A.L. and J. Youtie, "Where Does Nanotechnology Belong In The Map of Science?" *Nat Nanotechnol*, Vol.4, No.9(2009), pp.534-536.
- [67] Prahalad, C.K. and G. Hamel, "The Core Competence of The Corporation," *Harvard Business Review*, Vol.68, No.3(1990), pp.79-91.
- [68] Provan, K.G. and R.H. Lemaire, "Core Concepts and Key Ideas For Understanding

- Public Sector Organizational Networks : Using Research To Inform Scholarship and Practice,” *Public Administration Review*, Vol.72, No.5(2012), pp.638-648.
- [69] Provan, K.G. and H.B. Milward, “A Preliminary Theory of Interorganizational Network Effectiveness : A Comparative Study of Four Community Mental Health Systems,” *Administrative Science Quarterly*, Vol.40, No.1(1995), pp.1-33.
- [70] Roussel, P.A., K.N. Saad, and T.J. Erickson, *Third Generation R&D : Managing The Link To Corporate Strategy*, Harvard Business School Press, 1991.
- [71] Schreiber, T., “Measuring Information Transfer,” *Physical Review Letters*, Vol.85, No.2 (2000), pp.461-464.
- [72] Sci2 Team, *Science of Science (Sci2) Tool*, Indiana University and Sci Tech Strategies, [Computer Program]. Available At [Http://Sci2.Cns.Iu.Edu](http://Sci2.Cns.Iu.Edu). 2009.
- [73] Scott, J., *Social Network Analysis : A Handbook*, Sage Publications, 2000.
- [74] Shannon, C.E., “A Mathematical Theory of Communication,” *Bell System Technical Journal*, Vol.27, No.3(1948), pp.379-423.
- [75] Small, H., “Tracking and Predicting Growth Areas In Science,” *Scientometrics*, Vol.68, No.3(2006), pp.595-610.
- [76] Smith, K.G., C.J. Collins, and K.D. Clark, “Existing Knowledge, Knowledge Creation Capability, and The Rate of New Product Introduction In High-Technology Firms,” *The Academy of Management Journal*, Vol. 48, No.2(2005), pp.346-357.
- [77] Solé, R.V., S. Valverde, M.R. Casals, S.A. Kauffman, D. Farmer, and N. Eldredge, “The Evolutionary Ecology of Technological Innovations,” *Complexity*, Vol.18, No.4(2013), pp. 15-27.
- [78] Steeg, G.V. and A. Galstyan, Information Transfer In Social Media. *In Proceedings of The Proceedings of The 21St International Conference On World Wide Web* (Lyon, France 2012), Acm, 2187906, (2012), pp.509-518.
- [79] Tashiro, H., A. Lau, J. Mori, N. Fujii, and Y. Kajikawa, “E-Mail Networks and Leadership Performance,” *Journal of The American Society For Information Science and Technology*, Vol.63, No.3(2012), pp.600-606.
- [80] Teece, D.J., G. Pisano, and A. Shuen, “Dynamic Capabilities and Strategic Management,” *Strategic Management Journal*, Vol.18, No.7 (1997), pp.509-533.
- [81] Trajtenberg, M., “A Penny For Your Quotes : Patent Citations and The Value of Innovations,” *The Rand Journal of Economics*, Vol. 21, No.1(1990), pp.172-187.
- [82] Vicente, R., M. Wibral, M. Lindner, and G. Pipa, “Transfer Entropy-A Model-Free Measure of Effective Connectivity For The Neurosciences,” *J Comput Neurosci*, Vol.30, No.1 (2011), pp.45-67.
- [83] Wiener, N., *The Theory of Prediction* McGraw-Hill : New York, Ny, Usa, (1956), pp. 165-183.
- [84] Yan, E., “Finding Knowledge Paths Among Scientific Disciplines,” *Journal of The Association For Information Science and Technology*, Vol.65, No.11(2014), pp.2331-2347.
- [85] Yang, H. and W.-S. Jung, “A Strategic Management Approach For Korean Public Research Institutes Based On Bibliometric Investigation,” *Quality and Quantity*, Vol.49, No.4(2014), pp.1437-1464.



- [86] Yunsook, H., "Collaboration Management Strategies and Product Development Performance," *Journal of The Korean Operations Research and Management Science Society*, Vol.39, No.3(2014), pp.93-115.
- [87] Zhang, H, P. Meltzer, and S. Davis, "Rcirco : An R Package For Circo's 2D Track Plots," *Bmc Bioinformatics*, Vol.14, No.244(2013), pp.1-5.
- [88] Zhou, Y.B., L.Y. Lu, and M.H. Li, "Quantifying The Influence of Scientists and Their Publications : Distinguishing Between Prestige and Popularity," *New Journal of Physics*, Vol.14, No.3(2012).