

## 잠재적 후보기술 경로 탐색방법 : 바이오 연료 사례

이용승\* · 신준석\*\*

### <목 차>

- I. 서론
- II. 이론적 배경
- III. 연구 방법
- IV. 실증분석 결과
- V. 결론

**국문초록 :** 기존 주경로 연구는 과거 핵심기술의 진화를 구조화하는데 적합하나, 패러다임 전환기의 잠재적 후보기술 파악과 주류기술 교체를 예측하기는 어렵다. 본 연구는 링크 중요도, 성장 속도 지표, 핵심 루트 방법을 복합해 특히 인용 네트워크로부터 주경로상의 기술을 대체할 잠재적 후보기술들을 파악하는 방법을 제시한다. 링크 중요도에 기반해 주경로를 도출하고, 성장 속도 지표를 활용해 주경로 대비 고성장하는 잠재적 후보기술 경로들을 도출한다. 성장 속도 지표는 상대적 성장성 평가에 활용되고, 이를 통해 주경로를 교체할 가능성이 높은 잠재적 후보기술을 파악할 수 있다. 차세대 기술 후보들이 다수 등장해 경쟁하고 있는 바이오 연료기술에 적용한 결과 실제 차년도에 주경로상의 기술을 교체하는 후보기술들을 파악할 수 있었다. 기술 패러다임 전환기 후보기술에 대한 정량적 분석을 가능하게 하고, 주경로 기법의 활용범위를 미래기술 예측으로 확대한 측면에서 학문적 의의가 있다. 실무에서는 차세대 후보기술 파악의 정확도 제고에 기여할 수 있다.

주제어 : 주경로, 잠재적 후보기술, 성장 속도, 바이오 연료

\* 성균관대학교 기술경영학과 (mithras04@skku.edu)

\*\* 성균관대학교 시스템경영공학과 교수, 교신저자 (jsshin@skku.edu)

---

---

## Method to Identify Future Technology Candidates: Biofuel Case

Yongseung Lee · Juneseuk Shin

---

---

**Abstract :** Existing main path analysis is useful to clarify the backbone of technology developments over the past, but has difficulty in identifying future technology candidates, and also in anticipating changes in the mainstream technology. Our method develops a growth velocity indicator, and combines it with key-route analysis and traversal counts measure in the main path analysis. It enables us to identify rapidly growing paths of future technology candidates, and further to evaluate the relative growth potential of such paths by which can replace the mainstream technology in the main path. Our method can contribute to identifying future technology candidates in a quantitative way by using patents, and broaden the scope of main path analysis research toward foresight. It can be useful for technology strategy in practice. Biofuel technology is exemplified.

Key Words : Main path, future technology candidate, growth velocity, biofuel

# I. 서론

기술 패러다임 하에 사회경제적으로 선택된 기술은 급진적 혁신, 점진적 혁신, 확산과정을 거치며 기술 경로(technology trajectory)를 형성한다(Dosi, 1982). 기술경로는 과거의 주요 기술변화를 파악하고, 그 연장선상에서 미래기술을 예측하는데 적합한 개념이다(Mokyr, 2002). 특히 급진적 혁신이 촉발하는 새로운 기술 패러다임에 선제적으로 대응하려는 기업 및 정책 관계자들은 이 개념의 구체화에 많은 관심을 기울였다 (Robinson et al., 2013).

초기 연구들은 문헌연구와 전문가 인터뷰를 통해 과거의 주요 기술을 파악하고, 이후 기술간 연관관계를 정성적으로 해석해 경로를 구축했다 (Vincenti, 1994). 비교적 단순한 기술은 위의 접근법으로 충분했다. 그러나 기술복잡도와 특허, 논문 등의 기술데이터가 동시에 급증하면서 정성적 기법들은 한계에 직면했다. 복수의 전문가를 활용해도 모든 문서를 파악, 분석하기 어려워졌으며, 결과적으로 분석에서 누락되는 기술이 증가했다. 또한 활용 전문가 수의 증가는 주관적 편향(subjective bias), 편승효과(bandwagon effect)와 같은 편향의 증가로 이어졌다. Saviotti and Metcalfe(1984)는 기술의 핵심 특성(characteristic)을 축으로 활용해 2/3차원 공간에 기술경로를 가시화하는 접근법을 제시했다. 일부 제품, 기술에서는 매우 효과적이었지만 기술의 복잡화, 제품 다기능화로 인해 실제 활용은 제한적이었다. 반면에 특허 등의 문헌 데이터는 복잡화 및 융합화 되고 있는 기술 혁신 특성을 파악하기 위한 데이터로 활용되었다 (금영섭 & 옥주영, 2014).

일부 연구자들은 정성적 기법의 한계를 극복할 수 있는 정량적 기법들에 주목했다. 기술경로 구축의 핵심은 핵심기술 추출과 기술간 연관관계 파악이다. Garfield(1964)는 기술간 연관관계를 특허나 논문의 인용계로 파악하는 방법을 제안했다. Hummon and Doreian(1989)은 핵심기술이란 인용관계의 경로에 가장 빈번하게 등장하는 기술이라는 주경로(main path)의 개념을 제안했고, 이 경로를 정량적으로 파악하는 알고리즘(algorithm)을 개발했다. 후속연구는 두 가지 유형으로 분류된다. 연료전지(Verspagen, 2007), 리튬이온 배터리(Hung, 2014) 등 다양한 기술에 주경로 기법을 적용해 실용성을 제고하는 연구가 첫 유형이다. 두 번째는 일부 핵심기술 및 주경로 누락, 지나치게 긴 연산 소요시간 등 알고리즘 자체의 문제를 개선하는 유형이다 (Batagelj, 2004; Liu and Lu, 2012).

주경로 기법은 기술경로 개념의 구체화, 정량화, 자동화에 기여했으며, 대규모 문서 데

이터(data)를 활용한 주요 기술과 발전 경로 추출을 용이하게 만들었다 (Martinelli, 2012). 그러나 주경로의 종점 이후에 있는 미래기술 예측에는 한 가지 근본적 한계가 있다. 기존 패러다임하에서 기술변화는 본질적으로 점진적이다 (Dosi, 1982). 이 경우 미래 기술은 기존 주경로의 연장선상에 있어 예측이 쉽다. 문제는 패러다임 전환기의 기술이다. 이 시기에는 차세대 기술로 부상할 잠재력을 지닌 여러 후보기술이 등장해 경쟁하며, 다양한 새로운 경로를 형성한다. 기존연구들은 복수 주경로 파악(Liu and Lu, 2012)이나 파생경로 파악(Kim and Shin, 2018)을 위한 방법을 제시하고 있으나, 잠재적 후보기술들의 경로를 파악할 수 있는 방법은 아직 없다.

이러한 맥락에서 본 연구는 잠재적 후보기술들의 경로를 정량적으로 파악하고, 나아가 주경로를 대체할 가능성이 높은 경로를 추출하는 방법을 제시한다. 방법은 3단계로 구성된다. 우선 주경로 대비 급격히 중요성이 상승하는 개별 링크(link)를 파악한다. 이후 이 링크를 중심으로 전후방으로 중요성이 가장 높은 확장경로(path)를 탐색한다. 마지막으로 경로의 성장 속도 평균을 기준으로 성장 가능성이 높은 잠재적 후보기술 경로를 도출한다. 이를 위해 Hummon and Doreian(1989)이 제시한 중요도 지표(traversal count), 본 연구에서 개발한 성장 속도(growth velocity) 지표, Liu and Lu(2012)의 핵심 루트(key-route) 방법을 복합해 사용했다.

본 연구의 방법 적용에는 주류기술을 대체할 다양한 후보기술이 발전하는 기술분야가 적합하다. 바이오 연료기술은 비식용 에너지 화합물을 활용하는 2세대 기술에서 태양 에너지를 활용하는 3세대 기술로 이행중이다 (Lackner, 2017). 더욱이 다양한 신기술들이 개발되고 있어 차세대 주류기술의 불확실성이 높다. 즉, 주경로에 해당하는 기술 세대 전환이 진행중이며, 다수의 잠재적 후보기술이 존재한다. 이러한 기술적 특성을 고려해, 바이오 연료기술을 본 연구의 실증분석 대상으로 선택했다.

II장에서는 기존 주경로 분석 기법 선행연구와 바이오 연료기술을 간략해 소개한다. III장에서는 주경로 기법과 성장속도 지표를 중심으로 연구방법을 설명한다. IV장에서는 바이오 연료기술 대상 실증 분석결과를 제시하고, V장에서 연구의 의의와 한계를 짚어 본다.

## II. 이론적 배경

### 1. 주경로 분석(main path analysis)

기술 경로(technological trajectory)는 문제 해결을 위한 다양한 기술적 대안의 탐색과 사회경제적 선택 과정을 거쳐 구성된다 (Dosi, 1982). 기술 경로 내의 기술들은 시간축을 따라 순차적 인과관계를 가진다. 핵심기술들은 이전의 다양한 기술들이 수렴한 결과이거나, 다양한 기술로 분화하는 시발점이다 (Kim and Shin, 2018). 주경로(main path)는 핵심기술들로 구성된 기술경로로, 기술발전의 근간을 나타낸다.

기술간 순차적 인과관계의 대용지표(proxy measure)로는 논문 또는 특허 간 인용관계가 많이 사용된다. Hummon and Doreian (1989)은 인용관계를 활용해 핵심기술 발전 경로를 정량적으로 파악하는 주경로 분석기법을 개발했다. 그리고 다수의 기존 연구들이 기술간 연관관계와 발전 동향 분석에 있어 특허 인용의 유용성을 입증했다 (Chang et al., 2009, 강희종 & 김기국, 2014). 주경로 기법은 두 특허 간 인용관계를 링크(link)로 정의한다. 이후 특정 기간 내의 시점과 종점 특허를 연결하는 복수 링크로 이루어진 다양한 경로(path)를 모두 파악한다. 한 링크가 이 경로들 중에 포함되는 빈도를 링크의 중요도로 정의하고, 이 중요도가 높은 링크들을 연결해 주경로를 구성한다.

이후의 기존 주경로 기법 연구는 1)알고리즘 개선, 2)다양한 기술에 대한 적용(application)의 두 유형으로 분류할 수 있다. 알고리즘 개선은 링크의 중요도 계산, 링크 간 연결방법이 중심이다. 후자는 주로 다양한 부상기술(emerging technology)이 등장하면서 주류기술의 세대교체가 가능성이 높아지는 분야가 대상이다. 이 연구들은 주경로 기법을 통해 기술 진화를 이해하고, 나아가 기술전략/기획 측면의 활용 가치를 높이는데 초점을 두고 있다 (김준모 & 신준석, 2014).

Hummon and Doreian(1989)은 중요도 계산 방법으로 SPLC(search path link count), NPPC(node pair projection count), SPNP(search path node pair)를 제안했다. 세 방법 모두 소규모 특허 네트워크 분석에는 효과적이었으나, 대규모 네트워크 분석 시 낮은 연산 효율이 공통적인 문제였다. Batagelj(2004)는 연산 효율성을 높인 새로운 SPC(search path count) 알고리즘을 제안했다. 이후 실증연구들은 특허 네트워크의 규모가 커질수록 SPC의 연산시간이 기존 방법 대비 적어지는 것을 입증했다 (Liu et al., 2019). 링크 간 연결방법은 시점에서부터 중요도가 높은 경로를 순차적으로 선택하는 지역 전방(local

forward)이 기본 방법이다 (Hummon and Doreian, 1989). 이후 중점에서 후방으로 경로를 찾아가는 지역 후방(local backward), 중요도 총합이 높은 경로를 탐색하는 글로벌(global) 등이 제시되었으며, 중요도가 가장 높은 복수의 링크에서 전후방 탐색을 통해 경로를 구성하는 핵심루트가 가장 최근의 방법이다 (Liu and Lu, 2012; Liu et al., 2019).

주경로 기법을 적용한 연구는 다양하다. Verspagen(2007)은 Hummon and Doreian(1989)의 중요도 지표를 활용해 주경로를 도출하는 방법을 제안하고, 연료전지 특히 네트워크에서 기술진화 경로를 도출했다. Mina et al.(2007)은 관상동맥 질환 치료방법에 관한 논문/특허의 두 네트워크에서 기술진화 경로를 도출한 후 통합하는 방법을 제시했다. David et al. (2011)은 Verspagen(2007)의 방법을 활용해 의료분야 인공 디스크의 기술진화를 분석했다. 이후 연구들은 핵심루트 기법을 적용해 기술의 수렴과 확산 과정을 가시화했다. Ho et al. (2014)은 연료 전지 기술에, Hung (2014)는 리튬 이온 배터리 기술에 핵심루트 기법을 적용해 다양한 후보기술들의 특성이 차세대 기술로 수렴하는 기술진화 양상을 분석했다. Yeo et al. (2014)는 그래핀(graphene) 기술에 주경로 기법을 적용하면서 2차 마코프 체인(Second-order Markov chains)을 활용해 주경로 내 세부경로들이 수렴 후 종종 분기되지 않는 문제를 해결했다. Kim and Shin (2018)은 한 걸음 더 나아가 HVDC(High Voltage Direct Current) 기술을 대상으로 주경로에서 기술 분기점을 파악해, 기술의 분화를 파악하는 방법을 제시했다. 최근 연구들은 자동차, 3D 프린팅, 태양광 등 급진적 변화가 일어나는 기술을 대상으로 다양한 주경로 분석기법을 적용하고 있다 (Yan et al., 2018; Huang et al., 2017; Mubarok et al., 2019).

주경로 기법은 기술 진화 및 핵심기술 파악에 효과적인 도구다. 그러나 기술의 세대교체는 주경로 내에서만 이루어지지 않는다. 주경로 외의 보이지 않는 세부경로가 주경로를 대체하는 경우도 종종 발생한다. 그러나 이러한 변화는 주경로 상에서 일어나지 않기 때문에 사전에 탐지하기 어렵다. Yeo et al. (2014), Kim and Shin (2018)은 주경로와 연관된 세부경로들을 탐색하는 방법을 제시했으나, 주경로를 교체할 후보 경로 도출에는 이르지 못했다.

## 2. 바이오 연료기술

바이오 연료는 미래 유망 기술로서 탄소 에너지 사용 저감과 친환경 에너지 활용이라는 측면에서 주목을 받아온 기술이다 (Pandev et al., 2012; 감주식 et al., 2013). 바이오 연료기술은 크게 3세대로 구분된다 (Hill et al., 2006). 1세대 기술은 주로 사탕무, 옥수

수, 사탕수수 등 곡물을 원료로 바이오 에탄올(ethanol), 바이오 부탄올(butanol), 바이오 디젤(diesel)을 추출한다 (Hill et al., 2006;). 그러나 곡물가 상승으로 인해 기술의 경제성이 크게 감소했다.

2세대 기술은 목질계 바이오매스(Biomass)를 원료로 사용한다 (Demirbas, 2009). 2세대 기술은 크게 생화학/열화학 기반 전환기술로 분류된다. 생화학적 기술은 셀룰로스(Cellulose) 발효를 통해 바이오 에탄올/부탄올을 제조한다. 열화학적 기술은 원료에 압력과 열을 가해 가스화나 열분해 반응을 촉발하며, 결과물을 합성, 정제해 바이오-오일(bio-oil), 차(char) 등을 생성한다.

3세대 기술은 광합성을 통해 체내에 식물성 오일을 축적하는 미세조류를 사용한다. 매일 수확이 가능한 경제적 장점이 있다. 2세대 기술과 동일하게 생화학적 혹은 열화학적 전환 과정을 통해서 바이오가스, 바이오 에탄올, 바이오 디젤, 바이오 항공유 등을 생산한다 (박조용 외, 2016). 주요 세부기술은 미세조류 개발 및 배양, 수확, 오일 추출, 바이오 연료 전환, 부산물 활용 등이다.

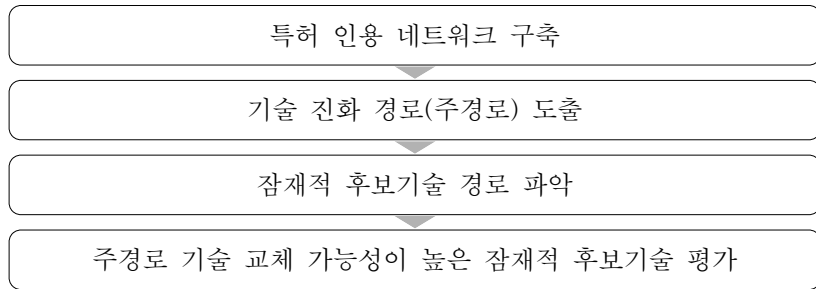
3세대 바이오 연료기술도 양산 생산성 및 에너지 단가가 약점이다. 이러한 약점을 보완하기 위해 연료혼합물 연소, 효소 및 세포 전극 분해, 식물성 기름과 지방질 혼합물을 활용한 디젤 생산 등 다양한 후보기술의 연구개발이 진행되고 있다. 즉, 3세대 기술의 세대 교체를 위한 다양한 후보기술이 존재하며, 기술 주경로가 잠재적 후보 기술경로로 대체될 가능성이 높다. 이상과 같은 바이오 연료기술의 특성은 본 연구의 방법 적용에 적합하다.

### Ⅲ. 연구 방법

#### 1. 연구 프레임워크

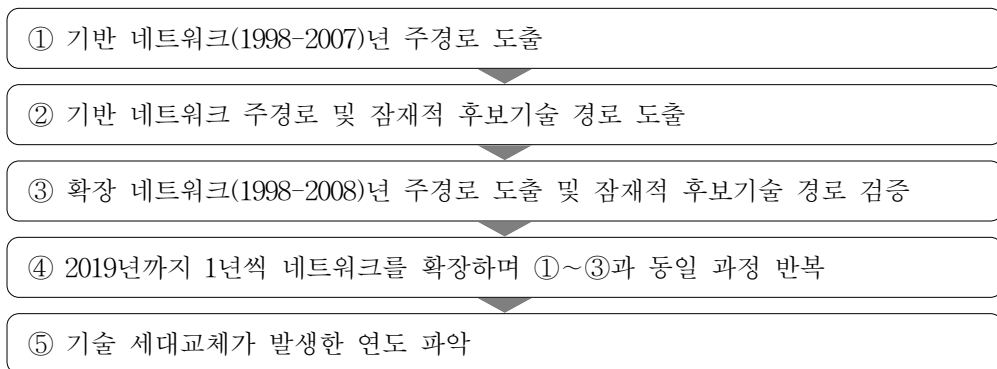
본 연구는 특허의 인용 데이터를 활용하여 주경로 대비 빠르게 성장하는 잠재 기술의 탐색이 목적이다. 특허는 유망기술 예측을 위한 주요 데이터로 활용되고 있다 (강희종 et al., 2006). 기존 기법은 중요도 지표가 높은 링크만을 선택하기 때문에 주경로가 지나치게 단순해지는 한계가 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해 기존 기법들은 임계치(tolerance)를 사용한다 (Liu and Lu, 2012). 임계치를 높이면 중요도가 낮은 링크들이 기존 주경로에 포함되는 효과가 있다. 문제는 두 가지다. 첫째, 주경로와 연결되지 않은 링

크들은 포함되지 않는다. 둘째, 중요도는 낮지만 빠르게 성장하는 세부 경로는 파악하기 어렵다. 본 연구에서는 1) 주경로와 연결되지 않은 독립적인 잠재 기술경로를 모두 파악할 수 있고, 2) 성장 속도 지표를 활용해 잠재 기술경로의 성장성을 정량적으로 파악, 비교할 수 있는 방법을 제시한다.



<그림 1> 연구 프레임워크

연구 프레임워크는 <그림 1>과 같다. 상용화된 기술 자료로 가장 적합한 특허를 수집하고, 신뢰성이 낮은 인용관계를 제거한 후 특허 인용 네트워크를 구축한다. 여기서 중요도가 가장 높은 링크를 파악한 후, 이 링크의 전후방으로 핵심루트 기법을 적용해 주경로를 도출한다. 이후 주경로 외부의 성장 속도가 기준치 이상인 링크들을 파악하고, 이 링크를 핵심루트 기법을 통해 전후방으로 확장해 잠재적 후보기술 경로들을 파악한다. 마지막으로 잠재적 후보기술 경로들의 평균 성장속도를 비교해 주경로 최종단의 기술을 교체할 가능성이 가장 높은 후보 경로를 도출한다. 분석 기간의 차년도까지 확장된 새로운 주경로 최종단에서 기술 교체가 발생했는지 여부로 결과를 검증한다.



<그림 2> 잠재적 후보기술 경로 파악 및 검증 과정

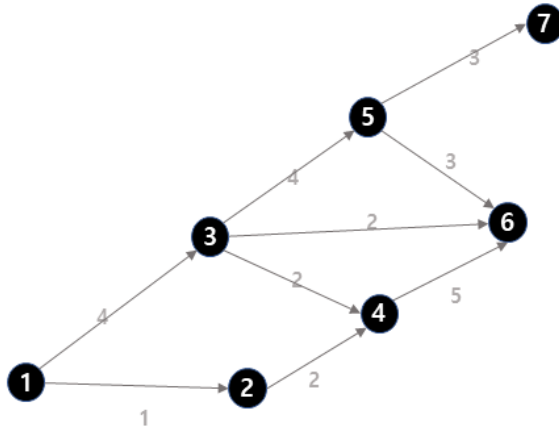


<그림 1>의 연구 프레임워크는 <그림 2>의 ①~③단계에 해당한다. 즉, 기본적으로 해당 단위기간의 잠재적 후보기술 경로를 파악한다. 본 연구의 단위기간은 1년이다. 단위기간 이상 기간의 주경로, 잠재 후보기술 경로, 기술 세대교체를 파악, 검증하기 위해서는 <그림 2>의 네 번째, 다섯 번째 단계가 필요하다. 기반 네트워크에서 시작해서 특히 인용 네트워크의 기간을 단위기간씩 확장하면서 주경로와 잠재 후보기술 경로 파악하고 잠재 후보기술 경로에 의한 주경로 교체 검증하는 과정을 반복하는 것이다. 본 연구에서는 1998-2007년의 특히 인용 네트워크를 기반 네트워크로 설정했다. 2006년 전후가 3세대 바이오 연료기술로의 이행 완료 시점이기 때문이다. 이후 1년씩 네트워크를 확장하며 주경로와 잠재적 후보기술 경로를 파악한다. 실제 기술 교체 여부는 분석 기간 최종년도의 차년도까지 확장한 네트워크의 주경로에 잠재적 후보 기술의 교체/포함 여부를 통해 검증한다.

## 2. 주경로 분석

특히 인용 네트워크는 개별 특허인 노드(node)와 인용 관계인 링크(link)의 집합으로 구성된다. 인용은 이후의 특허가 이전의 특허를 인용하는 비순환적(acyclic) 특성을 가진다. 따라서 네트워크의 유한한 노드와 링크의 집합으로 구성된 경로가 존재하며, 이 중 가장 중요한 경로가 주경로이다. 주경로 분석은 1)주경로 도출 목적, 2)네트워크의 규모를 고려한 세부 분석방법 결정이 중요하다.

본 연구의 목적은 주경로 대비 빠르게 성장하는 잠재적 기술 경로의 파악과 성장 가능성 평가다. 성장 가능성 비교의 용이성을 고려하면, 링크 중요도의 분산이 크면 좋다. 일반적으로 많이 사용되는 링크 중요도 계산 알고리즘은 SPLC, SPNP, SPC다. 기존 연구에서 링크 간 중요도 편차가 가장 크다고 검증된 방법은 SPLC다 (Mubarak et al., 2019). 네트워크 규모가 클수록 SPC 방법이 연산 효율이 좋으나, 본 연구의 네트워크 규모에서는 SPLC와 SPC의 효율이 비슷하다 (Ho et al., 2014; Huang e tal., 2017). 따라서 본 연구에서는 SPLC를 채택했다.



<그림 3> 네트워크의 SPLC 점수 예시 (회색)

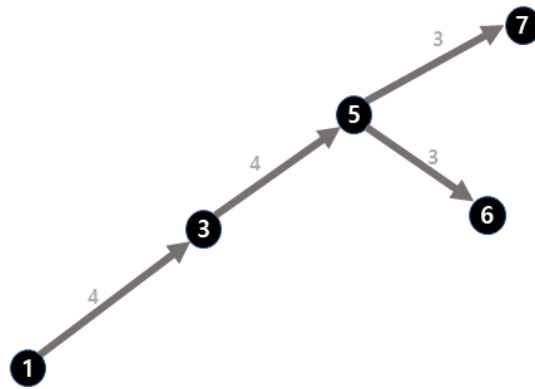
SPLC 알고리즘을 위의 예시에 적용하면 다음과 같다. 이 네트워크는 총 7개의 노드와 9개의 링크로 구성되어 있다. 각각의 노드에서 최종 목적지로 갈 수 있는 노드는 6번과 7번 노드이다. 이를 종착 노드라고 하자. 각 노드에서 종착 노드로 갈 수 있는 경로를 구하면 다음과 같다.

- ① 1 → 2 → 4 → 6
- ② 1 → 3 → 4 → 6
- ③ 1 → 3 → 5 → 7
- ④ 1 → 3 → 6
- ⑤ 2 → 4 → 6
- ⑥ 3 → 4 → 6
- ⑦ 3 → 5 → 7
- ⑧ 3 → 6
- ⑨ 4 → 6
- ⑩ 5 → 7

이 중에서 각 링크가 사용된 횟수를 세면 SPLC 점수가 된다. 예를 들어 경로 4 → 6은 ①, ②, ⑤, ⑥, ⑨ 총 5번 사용되었다. 따라서 이 경로의 SPLC 점수는 5이다. 이렇게 점수를 결정한 결과를 <그림 3>에서 보여주고 있다.

경로 탐색 방법은 지역 전방, 글로벌, 핵심 경로 기법이 주로 사용된다 (Liu et al., 2019). 본 연구는 주경로와 잠재적 기술경로간 핵심 링크의 중요도 비율(ratio)이 중요하다. 따라서 주경로와 잠재적 후보기술 경로 공히 핵심 링크를 누락할 가능성이 적은 핵심루트 탐색방법이 적합하다.

주경로 전방 탐색을 <그림 3>에 적용하면 다음과 같다. 1번 노드에서 시작하는 링크 중 점수가 높은 것은 1 → 3 (4점)이다. 따라서 이 링크가 선정된다. 이어서 3번 노드에서는 5번 노드로 연결되는 링크의 점수가 4점으로 가장 높다. 5번 노드에서 시작하는 두 개의 링크는 모두 3점으로 같다. 따라서 5 → 6, 5 → 7 두 링크 모두 선정된다. 따라서 전방 탐색으로 선정된 주경로는 아래 그림과 같다.



<그림 4> 전방 탐색으로 주경로 선정 예시

후방 탐색의 경우에는, 종착 노드에서 시작한다. 종착 노드 6, 7에서 끝나는 링크 중에서 가장 가중치가 높은 것은 4 → 6 (5점)이다. 이어서 노드 4에서 끝나는 링크는 3 → 4와 2 → 4가 있는데 SPLC 점수가 2점으로 같다. 따라서 두 링크 모두 선정된다. 이렇게 되면 3에서 끝나는 링크와 2에서 끝나는 링크를 모두 고려해야 하는데, 각각 1 → 3과 1 → 2 로 하나씩 존재한다. 따라서 이 링크를 모두 포함하는 링크가 후방 탐색으로 선정된 주 경로이다.

핵심루트 탐색방법은 핵심 링크의 시점을 중심으로 지역 후방, 종점을 중심으로 지역 전방을 탐색 방법을 적용한다 (Liu and Lu, 2012). 즉, 핵심루트를 기준으로 전방 탐색과 후방 탐색 방법을 모두 사용하는 것이다.

### 3. 잠재적 후보기술 경로 분석

본 연구에서는 잠재적 후보기술 경로를 주경로 대비 중요도의 성장 속도가 빠른 경로로 정의한다. 따라서 1) 경로 중요도 비교, 2) 성장 속도 측정이 필요하다. 전자는 경로와 다른 모든 경로에 대해 경로 전체 중요도 합을 비교하는 것이 기본적 방법이다. 그러나 연산 효율이 낮고 시간 소요가 많은 단점이 있다. 이 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 주경로와 잠재 기술경로의 중요도가 가장 높은 링크를 비교하는 방법을 사용했다. SPLC 방법은 개별 링크가 다수의 경로에 속할수록 높은 중요도를 가지며, 중요도가 가장 높은 링크의 전후로 확장한 경로들의 중요도 합이 포함하지 않은 경로 대비 높다 (Mubarok et al., 2019).

링크의 중요도 성장 속도는 시간  $t$ 와  $t-1$ 간 개별 링크의 중요도 증가량으로 정의할 수 있다. 본 연구에서는 주경로 대비 성장 속도 측정이 필요하다. 따라서 단위 시간에서의 개별 링크 중요도 증가량을 분자로, 주경로의 중요도 최대값 링크의 중요도를 분모로 사용한 비율지표를 잠재적 기술 후보의 성장 속도로 정의했다. 주경로의 링크 중요도를 대표하는 값으로 볼 수 있다. 주경로 핵심기술의 중요도를 잠재적 후보기술이 단위시간당 얼마나 추격했는지를 보여준다.

개별 링크의 중요도 성장 속도( $G_{t,ij}$ )는 아래의 식과 같이 정의할 수 있다.  $S_{t,ij}$ 는 시점  $t$ 에서 잠재적 후보 기술 경로의 한 링크를 결정하는 두 노드  $i, j$ 가 있을 때, 이 링크의 중요도다. 주경로를 구성하는 링크의 집합을  $M$ 이라고 하면,  $S_{t,mn \in M}$ 는  $t$  시점에서 주경로를 구성하는 노드  $m$ 과  $n$  사이의 개별 링크의 중요도다. 개별 링크의 시점  $t$ 와  $t-1$ 간 중요도 차는  $S_{t,ij} - S_{t-1,ij}$ 이며, 주경로상 핵심기술의 중요도 최대값은  $\max(S_{t,mn \in M})$ 이다. 두 값의 비율이 주경로 외부 개별 링크의 성장 속도가 된다.

$$G_{t,ij} = \frac{S_{t,ij} - S_{t-1,ij}}{\max(S_{t,mn \in M})} \quad (ij \in M^c)$$

$\max(S_{t,mn \in M})$ 을 기준값으로 선정하면 주경로의 핵심링크 대비 중요도 증가량을 파악할 수 있다.  $G_{t,ij}$  값을 이용하면 각 링크별 중요도 증가 속도를 파악할 수 있다.  $t$ 시점에서의 값을 기준 값으로 선정한 이유는 기존 주경로도 시간이 흐르면서 강화될 수 있으며 후보 경로가 기존 주경로를 대체하기 위해서는  $t$  시점에서의 중요도를 넘어서야 하기

때문이다. 주경로의 중요도가 증가할 수 있는 상황에서, 후보 경로의 중요도가 t 시점에서 주경로 핵심 경로의 중요도와 유사할수록 그리고 그 증가 속도(G)가 빠를수록 주경로를 대체할 가능성이 높다. 즉, 후보경로가 성장하는 속도가 기존 주경로의 대체 가능성을 염두해야 할 만큼 빠르지 파악하기 위한 지표이다. 이를 위해서 주경로에서 가장 중요도가 높은  $\max(S_{t,mn \in M})$ 를 기준으로 링크 성장 속도를 파악하였고, 해당 링크 주변으로 기술 개발이 활발하게 이루어지고 있는지를 나타낼 수 있다.

여기서 후보 경로 도출에 사용할 링크의 선정 작업이 필요하다. 너무 많은 링크를 선정하면 대체 가능성이 낮은 경로가 포함될 수 있다. 이는 결과 분석의 활용성을 낮춘다. 이를 위해서 G값의 기준값(threshold)를 적용한다. 시점 t의 특허 인용 네트워크에서  $G_{t,ij}$  값은 분포를 가진다. 과거에 기술 세대교체의 중심이었던 기술들의  $G_{t,ij}$  값을 기준으로 사용하면, 이 값 이상의  $G_{t,ij}$ 를 가지는 링크들은 t시점에서 주경로를 대체할 가능성이 높은 기술들로 분류할 수 있다. 이러한 개별링크를 중심으로 전-후방으로 링크를 확장하면 잠재적 후보기술 경로를 파악할 수 있다. 이 경로가 기존 주경로와 연결된다면 주경로의 파생(derivative) 경로일 가능성이 높다. 반면 기존 주경로와 독립적이라면 주경로를 대체할 가능성이 높은 잠재적 후보기술로 분류할 수 있다. 기존 주경로의 중요도 증가속도가 완화되고 있고, 잠재적 후보기술의 성장속도가 높을수록 주경로 대체가 발생할 가능성이 높다.

## IV. 실증분석 결과

### 1. 자료

새로운 바이오 연료기술 연구의 대부분은 대학 및 연구소보다 기업에서 이루어지고 있다. 따라서 기초연구보다 응용 및 상업화된 기술 정보를 풍부하게 포함하고 있는 특허를 분석 대상으로 선택했다. 다양한 국가의 특허 중 바이오 연료기술과 관련해 가장 광범위한 특허를 보유하고 있으며, 인용 정보도 상세한 미국 특허가 잠재적 후보기술의 다양성과 인용 데이터 신뢰성 측면에서 주경로 분석에 적합하다.

바이오 연료기술 관련 특허 수집을 위해 Arnold et al. (2019)와 Marvar et al. (2018)이 제안한 주요 바이오 연료기술 특허를 효율적으로 검색, 수집할 수 있는 CPC(Cooperative

Patent Classification) 코드를 활용했다. 주요 세부기술별 CPC 코드는 아래 <표 1>과 같다. 검색을 반복하며 수집한 특허의 키워드 및 내용을 분석해 CPC 코드와 검색어 조합을 업데이트하며 관련 특허를 수집하고, 관련성이 낮은 특허를 제거했다. 해당 특허 수집 시점은 2020년 2월이며 특허의 Publication 시점 기준으로는 2019년 특허가 가장 최근 특허였다. 또한 등록(Granted) 특허 번호를 수집하였다. 키워드 분석 및 검색어 업데이트 과정에서 4인의 바이오 연료기술 전문가의 조언을 참고했다. 이러한 과정을 통해 1세대 기술 특허의 시점인 1988년부터 2019년까지 총 9212건(1988-2019)의 특허를 수집했다.

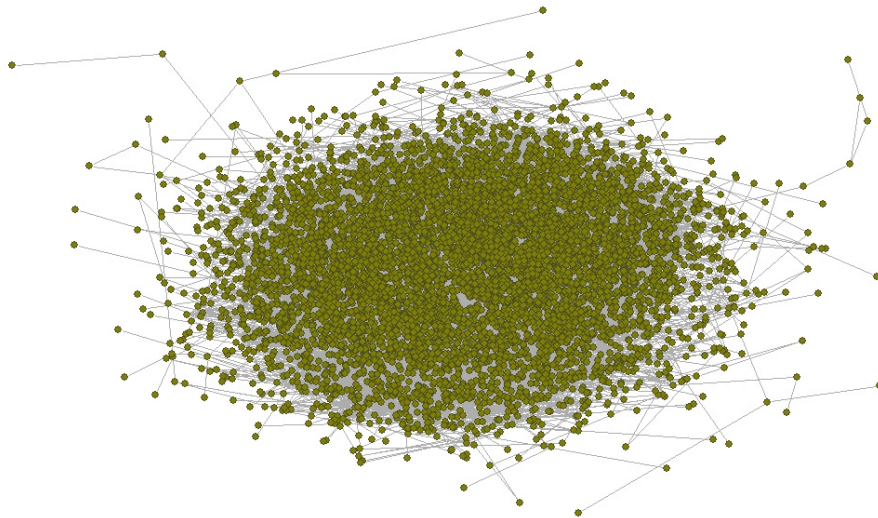
<표 1> 바이오 연료기술 특허 수집을 위한 CPC 코드

CPC 코드	설명	문헌
Y02E50/00	Technologies for the production of fuel of non-fossil origin	Arnold et al. (2019)
Y02E50/10	Biofuels	연구팀 추가
Y02E50/11	CHP turbines for biofeed	Marvar et al. (2018)
Y02E50/12	Gas turbines for biofeed	
Y02E50/13	Bio-diesel	
Y02E50/14	Bio-pyrolysis	
Y02E50/15	Torrefaction of biomass	
Y02E50/16	Cellulosic bio-ethanol	
Y02E50/17	Grain bio-ethanol	
Y02E50/18	Bio-alcohols produced by other means than fermentation	연구팀 추가
Y02P30/20	Bio-feedstock	Arnold et al. (2019)
Y02P30/40	Ethylene production	
Y02P30/42	(Ethylene production) using bio-feedstock	
C12M21/02	Photobioreactors (culturing algae)	
C12M21/04	(Bioreactors or fermenters specially adapted for specific uses) for producing gas, e.g. biogas (digesters for manure with production of biogas, biological treatment of water, waste water or sewage, preparation of natural gas or syngas)	
C12M21/12	for producing fuels or solvents (takes precedence: liquid carbonaceous fuels, solid fuels)	
C12M21/14	for producing enzymes	
C12N1/26	Processes using, or culture media containing, hydrocarbons (refining of hydrocarbon oils by using microorganisms)	
C12R1/89	(Processes using microorganisms) using algae	

## 2. 특허 인용 네트워크 구축

기존 연구들은 특허에서 발명자(inventor)간 인용이 기술 진화의 실제 관계라고 주장한다 (Verspagen, 2007; Yan et al., 2018). 이를 바탕으로 특허 등록 과정에서 추가된 인용을 모두 제외했다. 특허 심사관에 의해 추가된 인용은 구글 특허 데이터베이스(<https://patents.google.com>)를 통하여 파악하였다. 또한 패밀리(family) 특허간 인용관계는 세부 기술간 관계가 아닌 기술 범주간 관계를 비교적 잘 반영하므로 인용관계에 포함했다 (Liu et al., 2019). 마지막으로 피인용 특허가 인용 특허보다 후에 출원된 경우 등의 신뢰하기 어려운 인용을 모두 제외했다.

인용 스크리닝(screening) 과정을 거친 후 구성된 인용 네트워크는 총 6,944개의 특허로 구성된다. 가장 큰 세부 네트워크는 전체 특허의 96.7%인 6,718개의 특허를 포함한다. Girvan-Newman 알고리즘 등을 적용할 필요가 없이 핵심 세부 네트워크가 명확하므로, 여기에 본 연구의 잠재 후보기술 파악 기법을 적용했다. <그림 5>에서와 같이 분기된 주변 세부 네트워크의 수가 적고, 응집도가 높은 형태다.

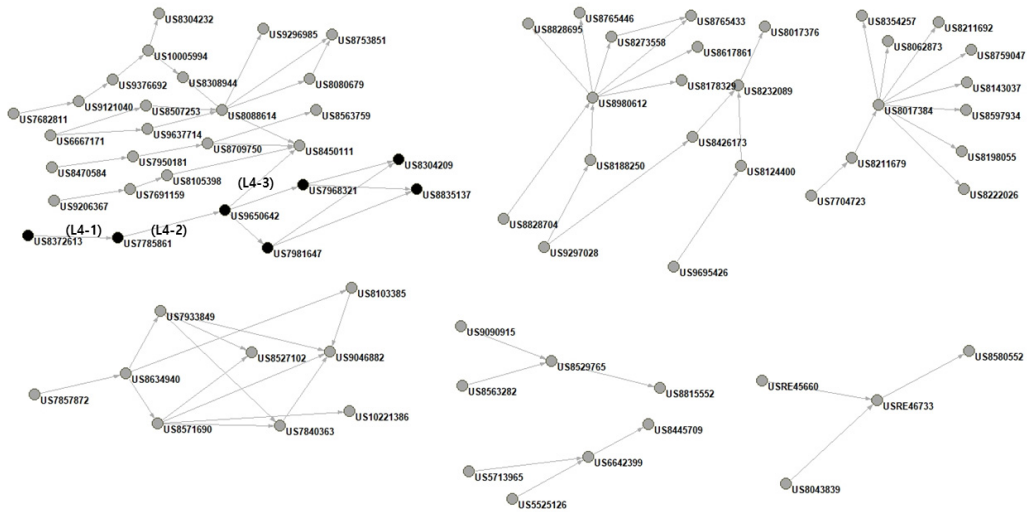


<그림 5> 바이오 연료 특허 인용 네트워크

### 3. 주경로-잠재적 후보 기술경로 분석

3세대 바이오 연료기술로의 세대교체가 이루어진 시점은 2006년 전후다 (Pandev et al., 2012). 따라서 4세대 잠재적 바이오 연료기술 후보 발굴을 위한 기술경로 분석의 시작 연도는 2007년이 적합하다. 즉, 1988년을 시점, 2007년을 중점으로 하는 주경로와 잠재적 기술경로를 파악한 후, 중점을 2019년까지 1년씩 연장하며 주경로와 잠재적 기술경로의 성장 추이를 파악한다. 본 연구의 목적은 주경로 최종단에서 발생하는 주류 기술의 교체다. 따라서 성장 속도 측정 대상은 최종연도의 주경로와 잠재적 기술경로의 기술들이다. 분석 결과 2011과 2015년에 주경로 최종단에서 주류 기술의 교체가 발생했다. 따라서 본 연구의 방법에 의한 2010/2014년의 잠재적 후보기술 경로 파악 결과를 중심으로 결과를 정리했다.

3세대로의 기술 세대교체가 이루어지는 시점이 2006년 전후로 볼 때, 데이터 상으로 2006년까지는 네트워크의 연결이 크지 않아 주경로가 도출되지 않았다. 이후 2007년에 첫 주경로가 발생하였으며, 2008년에 새로운 주경로로 대체되었다. 이 때의 주경로를 제외한 성장 속도( $G_{t,i}$ )의 평균은 0.16이다. 따라서 후보기술 경로 도출을 위한 링크 성장 속도의 기준값을 0.16으로 선정하였다.

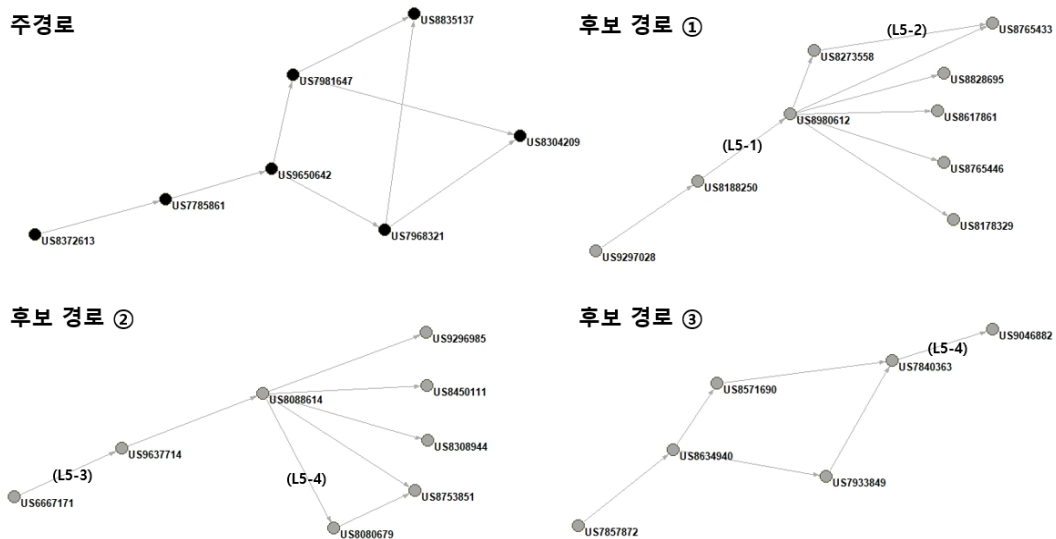


<그림 6> 2010년 바이오 연료기술 주경로(검정색)와 잠재적 후보기술 경로(회색) 탐색 결과 (링크 성장 속도 기준 0.16)



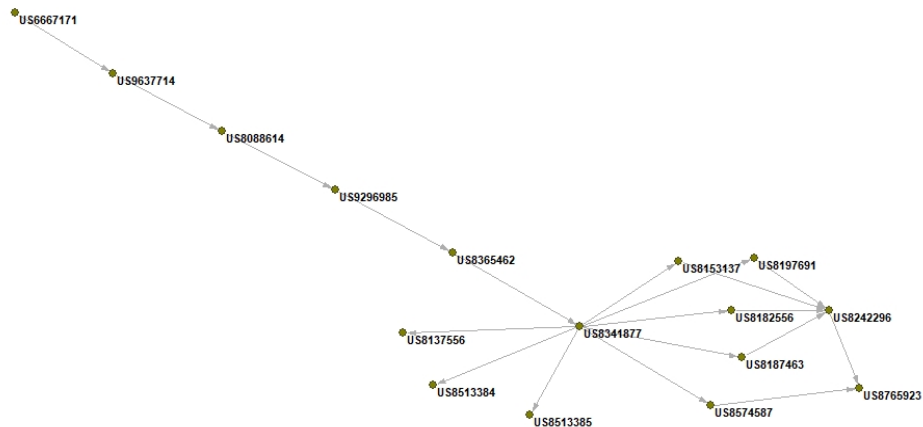
<그림 6>는 2010년의 주경로(검정색) 부분과 잠재적 후보기술 경로들(회색)이다. 주 경로에서 US8372613-US7785861(L4-1)를 연결하는 링크의 중요도가 가장 높았으며, 성장 속도( $G_{t,i}$ ) 또한 0.12로 가장 높았다. 그 다음으로 중요도가 높은 US7785861-US9650642(L4-2)로 이어지는 링크의 성장 속도 또한 0.12로 나타났다. 그 외의 주경로를 구성하는 나머지 6개의 링크의 성장 속도는 0으로 나타나 주경로와 관련된 기술 개발이 다소 정체되어 있는 것으로 나타났다.

링크의 성장 속도 기준값 0.16을 적용하는 경우, 2010년 기준 262개의 특허 중 75개 (28.6%)가 도출되었다. 성장 속도가 두드러지는 링크를 중심으로 정리하기 위하여 기준 속도를 0.5로 적용하여 결과를 도출하면 <그림 7>과 같다. 이 때 4개의 링크, US8188250-US8980612(L5-1, 성장 속도 0.59), US8273558-US8765433(L5-2, 성장 속도 0.59), US6667171-US9637714(L5-3, 성장 속도 0.53), US7840363-US9046882(L5-4, 성장 속도 0.53)가 가장 두드러지는 링크였다. 이 링크를 포함하고 있는 잠재적 후보기술 경로를 도출하면 <그림 5>에서와 같이 3개의 후보 경로를 도출할 수 있다. 경로 US8188250-US8980612(L5-1)와 US8273558-US8765433(L5-2)는 <그림 7>의 ①번 후보 경로에 포함되어 있다. ②번 경로의 경우, <그림 6>에서 기존의 주경로(검정색)가 포함되어있는 네트워크에 속해있다. ②번 경로는 US9650642-US8450111(L4-3)의 링크로 연결되어 있다. 하지만 <그림 7>에서 ②번 경로는 기존의 주경로와는 다른 방향으로 발전하고 있는 기술로 나타났다.



<그림 7> 2010년 바이오 연료기술 주경로(검정색)와 잠재적 후보기술 경로(회색) 탐색 결과 (링크 성장 속도 기준 0.50)

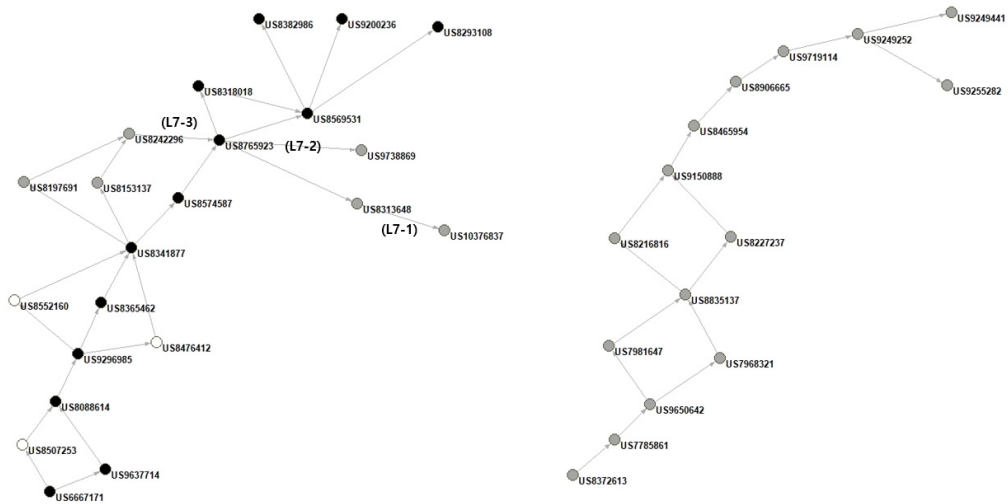
2010년에는 시아노박테리아(cyanobacteria) 활용 기술들이 주경로를 구성하고 있다. ①과 ③의 잠재적 후보기술 경로는 시아노박테리안 기반 바이오 연료 생산 프로세스 개선 및 효율 향상 기술들로 구성되어 있으며, 기술 속성상 주경로를 보조·강화하는 역할을 한다. 즉, 세대교체 가능성이 있는 잠재적 후보기술로 분류하기 어렵다. ②번 경로는 미세조류(microalgae)에서 오일/바이오 디젤을 추출하는 기술이다. 주경로 기술 대비 에너지 전환 효율이 높은 신기술로, 잠재적 후보기술에 해당한다. ①과 ②번 경로가 각각 평균 성장 속도가 0.33과 0.32로 ③번 경로 0.25 대비 높게 나타났다. 특히 ②번 경로의 경우 링크 US8088614-US8080679(L5-4, 성장 속도 0)를 제외한 평균 성장속도는 0.36으로 나타났다. 실제로 2011년까지 확장한 주경로에서는 <그림 8>에서와 같이 US6667171에서 시작하는 ②번 경로가 주경로의 최종단을 구성하게 된다. 시아노박테리아에서 미세조류로 주경로 기술 교체가 발생한 것이다.



<그림 8> 2011년 바이오 연료기술 주경로

<그림 9>은 2014년의 주경로와 잠재적 후보 기술 경로다. 2014년의 성장 속도 기준값은 2010년과 동일하게 0.16을 적용했다. 이 보다 높은 성장 속도를 보이는 링크는 총 12개가 있었다. 이 중에서 주경로와는 독립적으로 경로를 구성하는 링크는 총 9개였으며 나머지 3개는 기존 주경로에서 파생되는 형태를 보였다. 독립적인 경로를 구성하는 잠재적 후보기술 경로는 <그림 9>에서 독립적으로 존재하는 우측 회색 부분이다. 이 경로에 9개의 링크가 모두 포함되어 있다. 반면, US8313648-US10376837(L7-1), US8765923-US9738869(L7-2) 이 두 경로는 기존 주경로에서 파생되는 형태를 가지고 있으며,

US8242296-US8765923(L7-3)는 파생하였다가 주경로를 다시 강화하는 형태를 보여준다. 주경로 주변의 세 특허 US8552160, US8476412, US8507253(흰색 노드) 후보경로 확인을 위해 후방으로 경로를 연장하는 과정에서 추가된 것이다.

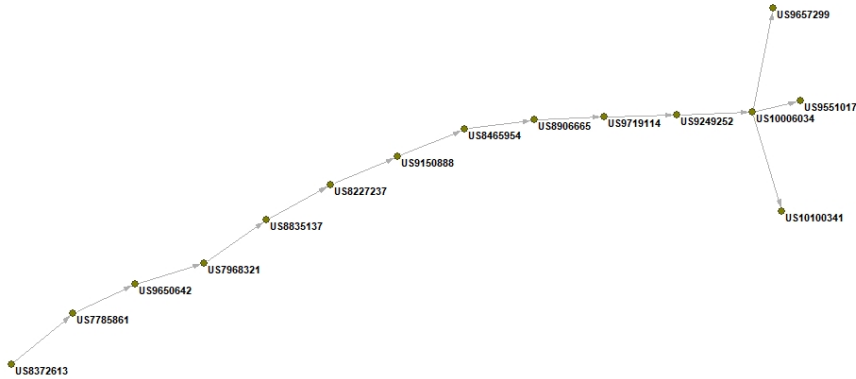


<그림 9> 2014년 바이오 연료기술 주경로(검정색)와 잠재적 후보기술 경로(회색) 탐색 결과 (링크 성장 속도 기준 0.16)

주경로의 2014년 부분은 미세조류 광합성에 기반한 오일 추출과 생산성 향상 기술로 구성되어 있다. 2011년부터 교체된 주경로 기술이 지속적으로 발전하고 있는 것이다. 이 중 회색으로 표시된 링크들은 주경로와 접점을 가지는 잠재적 후보기술들이다. 주로 생산성을 대폭 향상시킬 수 있는 기술들이다. 독립적인 잠재적 후보기술 경로는 미생물 (microorganism)에서 에탄올 중심의 에너지 자원을 생성하는 기술로 구성되어 있다. 이 경로 최종단의 US9719114, US9249441, US9255282 특허를 포함하는 DNA 제조합 기반 오일 생산 세포 생성 기술은 잠재 성장경로에서 가장 혁신적이다.

주경로에 접한 잠재적 후보기술 경로 중에서는 US8765923-US8313648-US10376837의 파생경로가 주목할 가치가 있다. 높은 성장속도를 고려할 때, 주경로 최종단의 US8765923에서 US8569631로 이어지는 경로를 대체할 가능성이 있기 때문이다. 대조적으로, US8242296과 같은 특허는 다시 주경로로 이어지면서 주경로를 강화하는 역할에 그치고 있다. 따라서 파생경로와 독립적 잠재적 후보기술경로가 주경로 최종단을 교체할 잠재적 후보기술이 된다. 2015년의 주경로 분석 결과, <그림 10>에서와 같이 독립적 잠

재적 후보기술 경로가 주경로 최종단을 구성한다. 독립적 잠재적 후보기술 경로의 평균 성장 속도는 0.17로 주경로에 접한 경로의 성장속도 0.13보다 다소 높았다.



<그림 10> 2015년 바이오 연료기술 주경로

## V. 결론

주경로 분석은 기술 진화의 근간이 되는 핵심기술 파악에 적합한 방법으로, Dosi (1982)의 기술 경로 개념의 조작적 정의(operational definition)와 도구화에 크게 기여했다. 과거 기술발전을 핵심기술 중심으로 구조화해 보여주지만, 경로 최종단에서 주류 기술을 대체할 잠재적 후보기술의 파악과 예측에는 한계가 있다. 본 연구에서 제시하는 방법은 주경로와 독립적으로 발전하는 잠재 후보기술 경로를 파악 가능하다. 나아가 성장 속도 지표를 통해 잠재적 후보기술의 상대적 성장성을 평가하고, 주경로 기술을 교체할 가능성을 평가할 수 있다. 즉, 기술 진화 개념의 핵심인 기술 패러다임 전환기의 기술 변화를 구체적으로 분석, 예측 가능한 방법을 제시한다는 측면에서 학술적 가치가 있다. 주경로 분석기법으로 범위를 좁히면, 과거 기술 진화의 구조화에서 미래 기술 예측으로 기법의 적용 범위를 확장했다는 의의가 있다.

기술전략 실무에서 잠재적 후보기술 파악과 관리의 매우 중요하다. 주류인 전문가 기반 기법들이 한계에 부딪히면서 선도기업들은 다양한 과학기술 문헌의 정량적 분석을 통해 기존 접근법의 약점을 보완하고 있다. 특히 기존 주류기술의 급격한 교체 가능성이 높은 부상기술을 파악하기 위해 많은 노력을 기울이고 있다. 그러나 데이터 기반 정량적

기법들은 향후 주류기술로 부상할 가능성이 있는 약한 신호(weak signal) 파악이 어렵다. 전문가 기반 기법들은 주관적 편향, 밴드웨건(bandwagon) 효과와 같은 다양한 왜곡의 문제를 겪고 있다. 본 연구의 방법론은 정량적 기법의 약한 신호 파악 역량을 제고할 수 있으며, 잠재적 후보기술 평가 정보 제공을 통해 전문가 기반 기법의 왜곡을 줄일 수 있다.

본 연구의 방법을 바이오 연료기술에 적용해 파악한 잠재적 후보기술들이 실제로 차년도에 주경로상의 기술로 성장하는 것을 확인할 수 있었다. 이 과정에서 주경로와 독립적으로 발전하는 잠재적 후보기술들이 주경로와 접점을 지니는 파생기술 대비 성장속도가 높았으며, 실제로 주경로상의 기술들을 교체했다. 바이오 연료기술 사례에 한정해 주경로에서 파생한 기술들은 상대적으로 성장 속도가 낮았으며, 성장에 한계가 있었다. 기술전략 측면에서 주류 기술과 완전히 다른 개념의 부상기술들에 대한 상시 모니터링의 필요성을 뒷받침해 주는 결과라고 판단된다.

본 연구에는 몇 가지 한계가 있다. 무엇보다 기술 교체를 주경로의 최종 연도에 국한하고 있기 때문에 주경로 후단의 다년간에 걸쳐 대규모로 발생하는 기술 교체를 파악하기 어렵다. 특히, 성장 속도 지표는 연간 변화를 사용하고 있는데, 이는 다년간 걸쳐서 변화하는 주경로를 좀 더 빠르게 파악하는 데에는 어려움이 있다. 이러한 한계는 이 연구가 주경로를 교체할 가능성이 있는 후보 경로를 탐색하는 데에 초점이 맞춰져 있어, 앞으로 1년 후 혹은 그 이후의 시간에서의 주경로 대체 가능성을 계량적으로 제시하지 못하고 있다는 점에 기인한다. 이는 G의 기준값을 정하는 부분으로 이어진다. 주경로 대체가능성을 계량적으로 나타낼 수 있다면 확률적인 개념을 도입하여 G값의 기준값을 제시할 수 있을 것이다.

또한 기준치 선정에 있어서, 성장 속도 기준치가 산업별, 기술별로 상이하고 기술수명 주기에 따라 변화할 가능성이 높으므로 다양한 산업 및 기술분야에 대한 후속 연구를 통해 정교화할 필요가 있다. 특허분석의 한계인 지표의 후행성, 인용 관계와 실제 기술적 영향간의 상관관계, 특허 출원되지 않는 기술의 문제들을 그대로 가지고 있으며, 실무 활용을 위해서는 이러한 문제들을 보완해야 한다. 특히 특허의 후행성은 특허 출원과 등록 과정에서 나타나는 지연으로 발생하는 한계이기 때문에 선행적인 분석을 위해서는 추가적인 데이터 활용이 필요할 것이다. 성장속도 지표 G의 경우, 대체 링크의 성장 속도에 초점을 맞추고 있다. 성장 속도 외에 중요도 수준의 비교, 주경로 구축법의 변화에 따른 변동성 등을 반영할 수 있는 접근법의 개발이 추가적으로 필요하다.

마지막으로 성장 속도가 가장 높은 링크의 시간축상의 위치에 따라 전후방 경로 확장

방법의 변화를 고려할 필요가 있다. 핵심 링크가 시간축상에서 앞에 있을수록 지역 전방이나 글로벌 합, 뒤에 있을수록 지역 후방이 적합할 것이다. 핵심루트(key-route) 기법은 시간축상에서 중간 근방에 있을 경우는 적합한, 위의 경우에는 일부 핵심기술을 누락할 위험이 있다.

# 참고문헌

## (1) 국내문헌

- 감주식 · 김무용 · 현병환 (2013), "특허정보 기반의 바이오 기술개발 트렌드 분석 및 유망기술분야 도출에 관한 연구". 「기술혁신연구」, 제21권 제2호, pp. 25-56.
- 강희중 · 김기국 (2014), "특허인용관계를 활용한 산업융합 파급효과 연구". 「기술혁신연구」, 제22권 제2호, pp. 31-50.
- 강희중 · 엄미정 · 김동명 (2006), "특허분석을 통한 유망융합기술의 예측". 「기술혁신연구」, 제14권 제3호, pp. 93-116.
- 금영섭 · 옥주영 (2014), "과학계량학을 활용한 공공연구개발 특허성과의 기술혁신 특성에 관한 연구". 「기술혁신연구」, 제22권 제3호, pp. 65-100.
- 김준모 · 신준석 (2014), "특허 인용 네트워크와 동적 기술트리 분석을 활용한 기술 진화 경로 연구: 초고압 직류송전 시스템 사례". 「기술혁신연구」, 제22권 제4호, pp. 117-143.
- 박조용 · 김재곤 · 박천규 (2016), "미세조류 유래 바이오연료 생산 기술에 관한 고찰". 「한국수소 및 신에너지학회논문집」, 제27권 제4호, pp. 386-403.

## (2) 국외문헌

- Arnold, M., Tainter, J. A., & Strumsky, D. (2019), "Productivity of innovation in biofuel technologies", *Energy policy*, Vol. 124, pp. 54-62.
- Batagelj, V. (2003), "Efficient algorithms for citation network analysis", *arXiv preprint cs/0309023*.
- Chang, S., Lai, K. & Chang, S. (2009), "Exploring technology diffusion and classification of business methods: Using the patent citation network", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 76, No. 1, pp. 107-117.
- Dehghani Madvar, M., Aslani, A., Ahmadi, M. H., & Karbalaie Ghomi, N. S. (2019), "Current status and future forecasting of biofuels technology development", *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 3, pp. 1142-1160.
- Demirbas, A. (2009), "Biofuels securing the planet's future energy needs", *Energy conversion and management*, Vol. 50, No. 9, pp. 2239-2249.
- Dosi, G. (1982), "Technological paradigms and technological trajectories", *Research policy*, Vol. 2, No. 3, pp. 147-162.
- Hill, J., Nelson, E., Tilman, D., Polasky, S., & Tiffany, D. (2006), "Environmental, economic, and energetic costs and benefits of biodiesel and ethanol biofuels", *Proceedings of the*

- National Academy of sciences*, Vol. 103, No. 30, pp. 11206–11210.
- Huang, Y., Zhu, D., Qian, Y., Zhang, Y., Porter, A. L., Liu, Y., & Guo, Y. (2017), "A hybrid method to trace technology evolution pathways: a case study of 3D printing", *Scientometrics*, Vol. 111, No. 1, pp. 185–204.
- Hummon, N. P., & Dereian, P. (1989), "Connectivity in a citation network: The development of DNA theory". *Social networks*, Vol., 11, No. 1, pp. 39–63.
- Hung, S. C., Liu, J. S., Lu, L. Y., & Tseng, Y. C. (2014), "Technological change in lithium iron phosphate battery: the key-route main path analysis". *Scientometrics*, Vol. 100, No. 1, pp. 97–120.
- Kim, J., & Shin, J. (2018), "Mapping extended technological trajectories: integration of main path, derivative paths, and technology junctures", *Scientometrics*, Vol. 116, No. 3, pp. 1439–1459.
- Lackner, M. (2017), "3rd-Generation Biofuels: Bacteria and Algae as Sustainable Producers and Converters", *Handbook of Climate Change Mitigation and Adaptation*, pp. 1201–1230.
- Lin, Y., Chen, J., & Chen, Y. (2011), "Backbone of technology evolution in the modern era automobile industry: An analysis by the patents citation network", *Journal of Systems Science and Systems Engineering*, Vol. 20, No. 4, pp.416–442.
- Liu, J. S., & Lu, L. Y. (2012), "An integrated approach for main path analysis: Development of the Hirsch index as an example", *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, Vol. 63, No. 3, pp.528–542.
- Liu, J. S., Lu, L. Y., & Ho, M. H. C. (2019), "A few notes on main path analysis", *Scientometrics*, Vol. 119, No. 1, pp.379–391.
- Martinelli, A. (2012), "An emerging paradigm or just another trajectory? Understanding the nature of technological changes using engineering heuristics in the telecommunications switching industry", *Research Policy*, Vol. 41, No. 2, pp.414–429.
- Mina, A., Ramlogan, R., Tampubolon, G. & Metcalfe, J.S.(2007), "Mapping evolutionary trajectories: Applications to the growth and transformation of medical knowledge", *Research policy*, Vol. 36, No. 5, pp.789–806.
- Mohammad Dehghani Madvar, Alireza Aslani, Mohammad Hossein Ahmadi, Narjes Sadat Karbalaie Ghomi (2019), "Current status and future forecasting of biofuels technology development." *International Journal of Energy Research*, Vol. 43, No. 3, pp. 1142–1160.
- Mubarok, M. H., Nafizah, U., & Permana, M. Y. (2019), "Mapping Technological Trajectories of Crystalline Silicon (c-Si) PV Using Patent Analysis", *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, Vol. 9, No. 4, pp. 1660–1671.



- Pandey, V. C., Singh, K., Singh, J. S., Kumar, A., Singh, B., & Singh, R. P. (2012), "Jatropha curcas: A potential biofuel plant for sustainable environmental development", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 2870-2883.
- Robinson, D. K., Huang, L., Guo, Y., & Porter, A. L. (2013), "Forecasting innovation pathways for new and emerging science and technologies", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol., 80, No. 2, pp. 267 - 285.
- Rotolo, D., Hicks, D. and Martin, B.R., (2015), "What is an emerging technology?", *Research policy*, Vol. 44, No. 10, pp. 1827-1843.
- Saviotti, P.P. and Metcalfe, J.S., (1984), "A theoretical approach to the construction of technological output indicators", *Research policy*, Vol. 13, No. 3, pp. 141-151.
- Verspagen, B. (2007), "Mapping technological trajectories as patent citation networks: A study on the history of fuel cell research", *Advances in Complex Systems*, Vol. 10, No. 1, pp. 93-115.
- Vincenti, W. G. (1994), "The retractable airplane landing gear and the Northrop "anomaly": Variation - Selection and the shaping of technology", *Technology and Culture*, Vol. 35, No. 1, pp. 1-33.
- Yan, J., Tseng, F. M., & Lu, L. Y. (2018), "Developmental trajectories of new energy vehicle research in economic management: Main path analysis", *Technological Forecasting and Social Change*, Vol. 137, pp. 168-181.
- Yeo, W., Kim, S., Lee, J. M., & Kang, J. (2014), "Aggregative and stochastic model of main path identification: a case study on graphene", *Scientometrics*, Vol. 98, No. 1, pp. 633-655.

□ 투고일: 2020.5.14. / 수정일: 2020.6.1. / 게재확정일: 2020.6.6.