

과학기술논문을 통한 에너지 연구 분야의 다학제 동태 추적분석

Tracking Interdisciplinary Relationships between Scientific Researches
in Energy Fields using Bibliometric Analysis

강종석(Jong-seok Kang)*, 정현상(Hyun-sang Chung)**, 이일형(Il-hyung Lee)***

목 차

- | | |
|---------------|--------------------|
| I. 서론 | IV. 전체 분야 연관도 전산모사 |
| II. 분야 연관도 측정 | V. 에너지 분야 연관도 전산모사 |
| III. 분석 대상 선정 | VI. 결론 |

국 문 요 약

본 논문에서는 과학적 논문분석(bibliometric analysis)을 통한 에너지 분야의 다학제적 연구 동태를 추적 분석하였다. 에너지 분야와 연계된 전체적인 학문적 상호관계를 고찰하기 위해서 동시발생법(co-occurrence method)으로 Thomson ISI(필라델피아, USA)에서 제공하는 학제분류(SC, subject categories)로 네트워크 지도를 구성하고, 시간에 따라 SC들 상호간의 연계강도 변화를 계측하였다. 네트워크 지도에서 제공된 SC그룹들의 특징적 성격을 파악하고, 그들의 시간에 따른 연계강도 변화를 추적한 결과, 에너지 분야와 직접적으로 연계된 열역학, 연료, 화학화공, 그리고 전기화학 분야는 보다 세분화된 학문 분야로 분화(differentiation)되는 특징적 추이를 보이는 반면, 핵물리 분야는 핵 과학기술로 기초 학문분야의 틀을 벗어나 거시적 산업단계의 위상으로 융합 발전하고 있음을 파악할 수 있었다. 또한, 환경과학 분야는 에너지 분야와의 학문적 연계강도가 4년 전 보다 최근에 급격히 높아져 에너지 분야와 환경 분야의 융합적 성격이 강화되고 있음을 확인할 수 있다.

본 연구를 통해서 정부가 수립하는 에너지 정책의 결합성 있는 검토를 통해서 에너지 분야의 학문적 융·복합적 특성을 만족하는 국가 에너지 의제를 유지하는 데 도움을 주고자 한다.

핵심어 : 에너지 및 연료 기술, 다학제, 네트워크 지도, 계량적 문헌분석, 동태추적

※ 논문접수일: 2010.7.16, 1차수정일: 2010.11.3, 게재확정일: 2010.11.26

* 한국과학기술정보연구원 선임연구원, kangjs@kisti.re.kr, 02-3299-6048, 교신저자

** 한국과학기술정보연구원 선임연구원, hschung@kisti.re.kr, 051-831-0761

*** 한국과학기술정보연구원 책임연구원, illee@kisti.re.kr, 051-831-0760

ABSTRACT

In this paper, we attempted to analysis and track dynamic properties of the interdisciplinary relationship between scientific research areas in energy field using bibliometric analysis. We created network maps with SCs (subject categories) defined from WoS[®] (Web of Science, Thomson Scientific ISI, Philadelphia, USA) using co-occurrence analysis method in order to identify overall disciplines directly linked with energy fields and investigate the change of interaction between SCs as a function of time. From the results of this study, thermodynamics, fuels, chemistry/chemical engineering, and electrochemistry have differentiated into more specific disciplines while the strength of interaction with energy field gradually has increased. Meanwhile, "nuclear physics" was developed to "nuclear science & technology" toward applicable target sector and also the interaction of "environmental science" with "energy generation area" among various energy disciplines recently showed the radical increase as compared with the values of 4 years ago.

Finally, through combinative reviews of today's energy policy established by South Korea government, this study will give a help for keeping up with national energy agenda meeting the diverse characteristics of academic disciplines of energy field. In addition, our results support that the use of such network analysis based on bibliometric analysis to discern shifts in academic R&D strategies and target sectors.

Key Words : Energy & fuel technology, Interdisciplinary relationship, Network mapping, Bibliometrics, Tracking dynamic properties

I. 서 론

1. 연구의 배경

최근 선진각국들은 에너지 생산과 소비에 관한 정부차원의 강력한 추진방안을 다각적으로 모색하고 있다. 미국의 경우 2000년대 들어 범국가적인 에너지 전략을 수립하고 에너지 분야의 강력한 연구개발을 국가 주도적으로 추진하고자 하는 내용을 발표하였다¹⁾. 아시아권에서는 일본이 유일하게 산학연 협의를 통한 종전의 에너지정책을 한층 강화하는 「21세기 에너지 절약정책」 수립하고, 관련 에너지 생산 및 다변화에 필수적으로 소요될 것으로 예측되는 기술 발굴 및 연구개발을 강화하고 있다²⁾.

국내에서도 이미 정부차원에서 에너지 수급 및 생산에 관한 다각적인 대처를 위해 수소에너지 생산 및 응용, 원자력 에너지, 풍력·지열·태양열의 활용에 관한 적극적인 연구개발을 추진해 오고 있으며, 특히 연료전지 분야의 부상으로 바이오매스를 활용한 메탄올의 생산까지를 포괄하는 연구개발을 지원하고 있다.

전 세계적으로 진행되고 있는 에너지 분야 연구개발의 특이성을 파악하고, 효과적으로 대처하는 것은 무엇보다 중요한 국가적 과제다. 에너지 분야의 연구개발 인력과 자원이 절대 부족한 우리로서는, 축적되어 있는 과학기술 및 산업정보를 체계적으로 활용하여 연구개발 및 기술개발의 노력과 시간을 단축시킬 수 있는 국가전략을 마련해야 한다. 국가전략을 수립하는데 있어 첫 번째 단계는 경제·사회적으로 커다란 이익을 가져올 것으로 예상되는 신기술을 찾는 것이다. 미래기술예측활동과 관련된 사례조사 결과를 간략하게 살펴보면 다음과 같다.

영국의 SPRU는 미국의 Thomson사에서 제공하는 Research Front를 활용하여 공인용 분석으로 확인된 분야 전문가를 모집단으로 선정하고 그들에 대한 전문가 델파이를 통해 미래 유망 기술 분야로서 에너지 분야를 선정하였다.³⁾ 미국 MIT는 10대 기술에 연료전지 및 태양 전지를 포함한 재생에너지 개발을 주요 연구과제로 발표하였다. 최근에는 GE(General Electronic Inc.)가 미래 핵심사업 위주로 사업구조를 전면 개편하면서, 향후 4대 미래전략산업육성 및 중점추진방향 중에 에너지 관련 산업을 지목하였다. 국내에서도 2005년 「국가과학기술위원회」에서 선정한 「미래 국가유망기술21」에서 파악할 수 있듯이 국가적 차원의 에너지 분야에 대한 적극적인 연구개발 의지를 확인할 수 있다.

1) 2000년대 에너지 전략, I. 미국의 에너지 중장기 전략(국회 도서관) 2006

2) 2000년대 에너지 전략, II. 일본의 21세기 에너지 절약 정책(국회 도서관) 2006

3) Science Foresight Project, Final Report Vol.1, SPRU Sussex Univ., J. S. Katz

미래 유망 기술 분야에서 에너지 분야는 여러 조사 결과에서 중요하게 다루어지는 분야이다. 「에너지 분야」 연구개발은 그 기술 내용의 포괄성으로 인해 다학제적 성격이 강하고, 또한 학문적 영역이 광범위해서 에너지 분야에서 가지는 독특한 특성들을 파악하는 것은 쉽지 않다.

〈표 1〉 「미래 국가유망기술21」에 선정된 기술 분야

기술분야 (21개)	세부기술 (핵심요소기술 240개 분야)	국내실현시기(년)
핵융합	핵융합장치, 원격제어 등	2026
유비쿼터스 기반건축	유비쿼터스 기반시설마련, 미래형도시 관리	2013
해양영토관리	해양환경보전, 해양공간자원 이용	2017
초고성능 컴퓨팅	슈퍼컴, 착용형 컴퓨터	2012
인공위성	위성본체개발, 광학 탑재체 개발	2017
고부가생물자원	유전자변형식품 작물 개발, 기능성동물 생산	2015
재생의과학	줄기세포, 이종장기치료, 암발생 전이메커니즘	2017
나노 고성능 소재	기능성 소재, 친환경 소재	2012
기후변화 예측 대응	기후변화 관측분석, 기후변화 시나리오 생산	2015
인지과학 로봇	휴머노이드 로봇, 뇌-기계 인터페이스	2017
초고효율 물류관리	차세대 비행체 초고속 운송	2016
청정 신재생 에너지	수소에너지, 풍력, 태양광, 연료전지생산 및 저장	2016
지식과 정보 보안	통합정보보호시스템 테러방지 암호제작 해킹방지	2013
감성형 문화콘텐츠	오감체험형 엔터테인먼트, 차세대 디스플레이	2013
실감형 디지털 컨버전스	와이브로/DMB, 지능형 통합정보 방송	2013
생체 방어	바이오 디펜스, 박테리아 관리 등	2014
맞춤 의학·신약	맞춤의학, 유비쿼터스, 생체정보 수집관리 활용	2018
지구관측기 시스템	위성발사, 위성영상, GIS GPS 통합운영	2014
재해·재난예측 시스템	풍수해 지진예측 재해기상 예측	2014
생태계보전 복원	해수담수, 수자원 재이용, 폐기물 재이용	2014
차세대 원자력 시스템	원자력 안전관리, 원자력 폐기물 처리	2013

※ 21개 미래 유망기술은 전문가들로 구성된 '미래 국가유망기술위원회'가 2005년 5월 과학기술예측 조사를 통해 발표한 761개 기술과제를 대상으로 시장성(경제성)과 삶의 질, 공공성(국가안위·위상 제고) 등 3개 기준에 맞춰 선정된 것임.

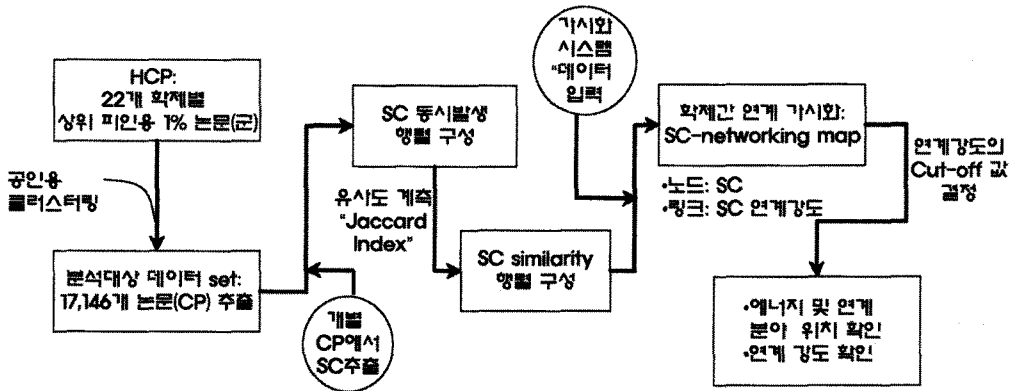
2. 연구의 목적

본 연구에서는 에너지 분야의 타 분야 연계 특이성을 파악하기 위해 에너지 분야와 관련된 연계 분야의 동적 변화를 추적하는 연구를 수행하고, 이를 통하여 에너지 분야 연구개발의 동적 양태를 파악하여 향후 발전 양상을 이해하고, 최종적으로는 우리나라 에너지 정책·전략 수립에 필요한 시사점을 끌어내는데 목적이 있다.

3. 연구 방법

본 연구의 분석 방법은 전적으로 계량적 방법으로 수행되었으며, 분야 전문가 델파이를 통한 분석 내용의 이해를 고려하지 않았음을 밝혀 둔다. 또한 본 연구에서 분석항목으로 선정한 각 핵심논문의 분류코드는 Web of Science(Thomson ISI, USA)⁴⁾에서 부여한 것을 그대로 활용하였다. 통상적으로 Thomson사는 각 개별 발표논문에 대하여 상기 언급된 학제분류코드를 복수로 부여하여 연구내용에 대한 학문적 특성을 정의하고 있다. 따라서 특정 분야의 학제분류코드를 추출함과 동시에 연계된 학제분류코드를 추적할 수 있도록 지원한다.

본 연구에서는 선행연구(KISTI, 2005)에서 도출한 391개의 연구영역에 포함되어 있는 핵심논문(CP, Core Papers)⁵⁾ 17,146건을 분석 모집단으로 선정하여, 각 핵심논문이 속해있는 학제분야(SC, Subject Category)⁶⁾간의 동시발생분석을 수행하였다. 에너지 분야의 연구개발에 있어서 「다학제 협력 특성」을 파악하기 위해 SC간의 전체 연관도 맵을 전산모사를 통해 확보하고, SC 중에 에너지 분야와 연관되어 있는 모든 분야를 추출, 발생빈도 및 연계강도를 추적하였다. 따라서 「분야 협력의 양상」은 에너지 분야와 동시 발생하는 SC의 도출과 도출된 SC간의 연관강도를 기준으로 정의될 것이다.



(그림 1) 연구수행 프로세스 모식도

- 4) 미국 Thomson ISI사(<http://www.isinet.com>)의 ISI Web of knowledge DB(WoS, SCIE)에 등록된 논문
- 5) 미국 Thomson ISI사에서 정의하고 있는 학문분류에 따라 각 학문분야별 피인용 1%이내의 고 피인용 논문을 HCP로 모집단을 정의하며, 이 모집단을 대상으로 공인용 클러스터링(co-citation clustering)을 통해 하나의 연구 분야로 묶이는 논문들을 핵심논문(CP)로 정의함
- 6) 미국 Thomson ISI사에서 정의하는 22개 학제분류로서 각 개별 논문을 기준으로 복수의 학제분류(코드)를 부여함. 따라서 본 연구 내용에서 언급하고 있는 에너지 분야는 SC 분류코드를 기준으로 제시된 것임. 자세한 내용은 <http://scientific.thomson.com/notice/>를 참조

II. 분야 연관도 측정

에너지 분야의 연구개발은 특정 분야 또는 학문에 국한되지 않는 특성을 보일 것으로 예상되며, 변화되는 사회·환경적 요인에 따라 요구되는 분야 협력의 양상 또한 복합적 요소로 나타날 것으로 추측된다.

이러한 에너지 분야의 연구개발에 있어서 「다학제 협력 특성」은 연구개발의 결과물이 특허보다는 논문으로 가시화되는 경향이 높을 것으로 파악됨에 따라, 특정 국가 및 연구기관에 한정하지 않고 전 세계적으로 발표된 핵심논문(CP) 분석을 통해 이루어졌다. 본 연구 대상인 ‘에너지 분야’는 Web of Science에서 제공되는 SC7)라는 분야 코드를 활용하였고, 개별 논문에는 복수의 SC가 부여될 수 있다.

에너지 분야의 「다학제 협력 특성」은 SC의 동시발생분석을 통하여 이루어진다. 예를 들어, 임의의 두 SC가 하나의 논문에 동시에 발생한다면 이들 두 SC는 상호 연관되어 있다고 할 수 있을 것이다. 따라서 전체 SC의 동시발생 여부를 분석하고, 에너지 분야의 연구개발에 있어서 요구되는 분야(SC)의 상호 연관관계를 추출하고 분석할 수 있을 것이다.

III. 분석 대상 선정

선행 연구에서 Web of Science를 활용하여, 각 년도 및 각 분야(저널분류 22분야, <표 2> 참조)에서 피인용도가 상위 1%인 고평인용논문(HCP, 1999년~2005년 7월, DB 수록시점 기준)을 모집단으로 선정하고, 공인용 분석을 통한 유망연구영역을 도출하였다⁸⁾. 본 연구에서 사용한 피인용 기준 상위 1%의 논문(군)을 선별한 것은 2가지의 전략적 측면을 고려한 것이다. 분석 모집단의 크기를 줄임으로서 시스템적 구동 원활성을 확보하기 위한 것이며, 또한 고평인용 논문은 해당 분석 기간의 핵심적 연구내용으로 분야별 대표성을 부여하기 위함이다. 통상적으로 Web of Science에서는 피인용 상위 1% 범위의 고평인용 논문을 그룹화 하여 분야별 연구전선(Research front)으로 정의하고 주기적으로 변화내용을 데이터베이스화 하고 있다.

본 연구의 목적은 에너지 연구에 대한 중장기적 시간변화에 대한 다학제적 연계성을 파악하고자 하는 것이며, 이러한 학문적 연계성을 관찰하고자 하는 분석 방법 및 프로세스에 현재 연구의 목적으로 설정하였다. 따라서 전체 연구의 관찰 범주를 1999-2005년과 2005-2010년

7) 홍성준 (2008), “미래전략 에너지기술개발 영향요인 중요도 산출 - AHP 적용 중심으로 -”, 홍성준 외 4인 공저, 「한국신재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회 논문집」, pp. 91-94

8) KISTI는 391개의 유망연구영역을 도출하고, 그 중에 전문가 검증을 통하여 최종 272개의 유망연구영역을 선정함 (2005, 미래 유망연구영역 선정에 관한 연구)

〈표 2〉 Thomson ISI의 저널 분류

번호	22개 대분류(국문)	22개 대분류(영문)	학술잡지수
1	농업과학	Agricultural Sciences	424
2	생물/생화학	Biology & Biochemistry	637
3	화학	Chemistry	694
4	임상의학	Clinical Medicine	2040
5	컴퓨터과학	Computer Science	391
6	경제/경영	Economics & Business	432
7	공학	Engineering	1065
8	환경/생태학	Environment/Ecology	314
9	지구과학	Geosciences	372
10	면역학	Immunology	122
11	재료과학	Materials Science	383
12	수학	Mathematics	342
13	미생물학	Microbiology	137
14	분자생물/유전학	Molecular Biology & Genetics	278
15	융합분야	Multidisciplinary	60
16	신경/행동과학	Neuroscience & Behavior	260
17	약학/독성학	Pharmacology & Toxicology	205
18	물리학	Physics	374
19	식물/동물과학	Plant & Animal Science	871
20	정신의학/심리학	Psychiatry/Psychology	599
21	사회과학 일반	Social Sciences, general	1448
22	우주과학	Space Science	68
	합 계	2003. 3 기준	11,516

※ 본 연구에서는 경제/경영, 정신의학/심리학, 사회과학 일반 등 과학기술과 관련 없는 3개 분야는 제외됨.

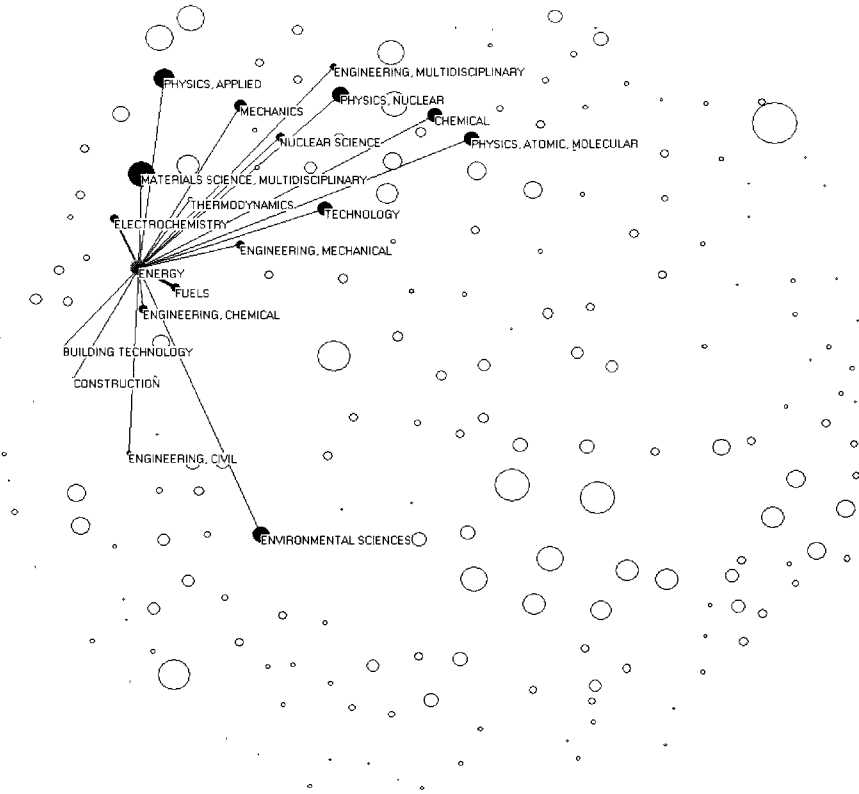
까지로 양분하였고, 1차적으로 본 연구의 분석범주(1999-2005년)에 한정하여 제시된 연구를 수행하고자 한다.⁹⁾ 이에 본 연구에서는 선행연구(KISTI, 2005)에서 도출한 391개의 연구영역에 포함되어 있는 핵심논문(Core Papers) 17,146건을 분석 모집단으로 이용하였다.

IV. 전체 분야 연관도 전산모사¹⁰⁾

전체 분야 연관도 전산모사는 에너지 분야의 현황을 조망하는데 필요한 부분이며((그림 2) 참

9) 2005-2010년까지의 다학제 연계성 분석 및 현재 연구와의 비교분석은 현재 추진 중에 있으며, 동 학회에 발표 예정임

10) 데이터의 전반적인 처리와 전산모사는 Vantagepoint와 BTM을 동시 활용하였고, 연관계수 측정은 i요소와 j요소 간의 연계강도는 ij요소 동시보유 (정량적)양으로 산출되는 jaccard index를 사용하였고, 수학적 정의는 $J_{ij} = C_{ij} / (C_{ii} + C_{jj} - C_{ij})$ 로 표현됨.



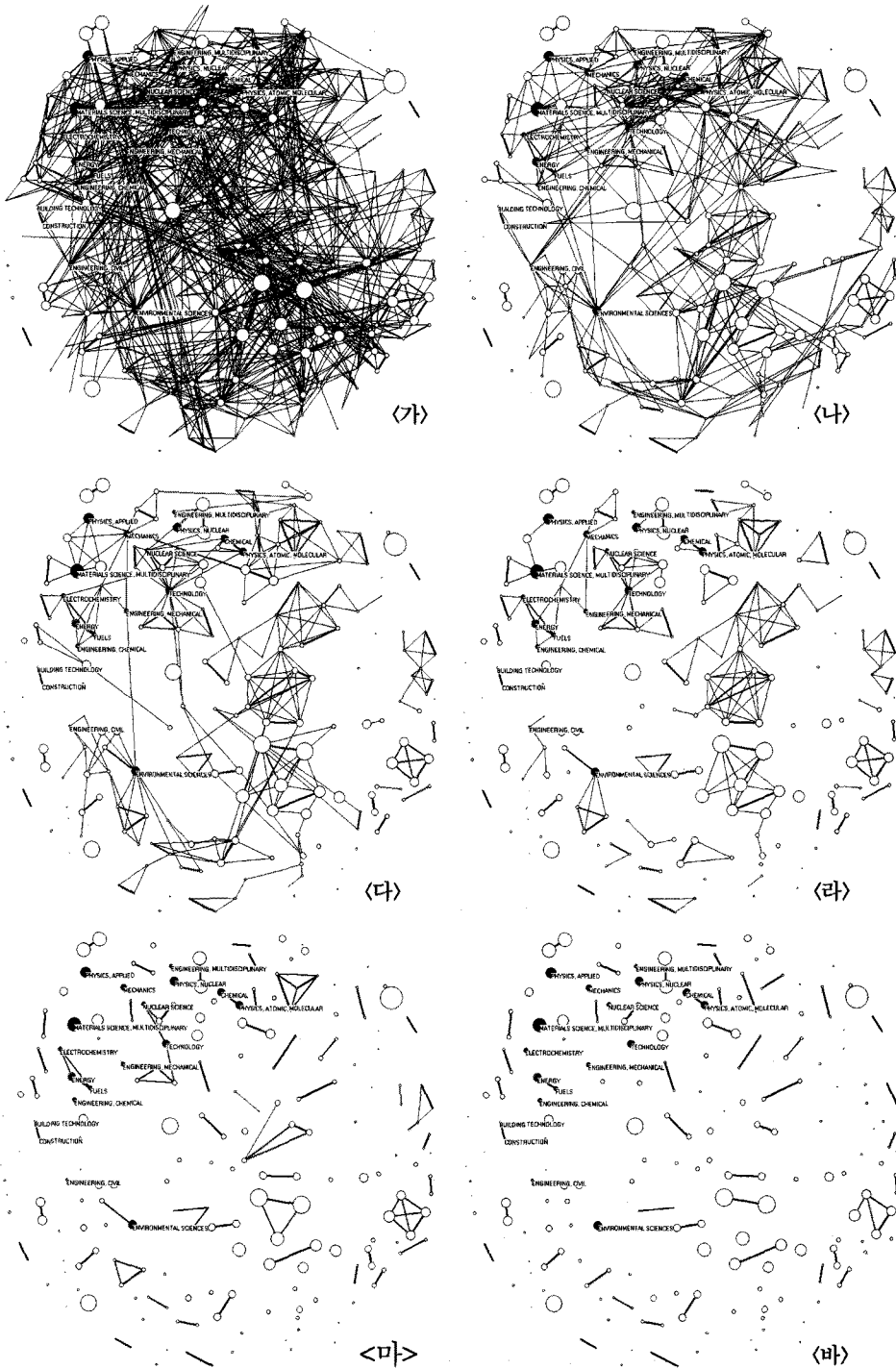
(그림 2) 에너지 분야와 관련되는 분야 코드의 확인

조), 특히 연관강도의 크기(통상 cut-off 값이라고 함)를 임의 조절하여 전체 네트워크에서 분야 간 연계성이 높은 영역을 추출하였다(node는 분야, linkage는 동시발생연관성 또는 강도).¹¹⁾ 임의 조절된 전체 분야 연관도 전산모사의 결과는 다음과 같다.

<표 3> cut-off 값의 변화에 따른 네트워크 특성

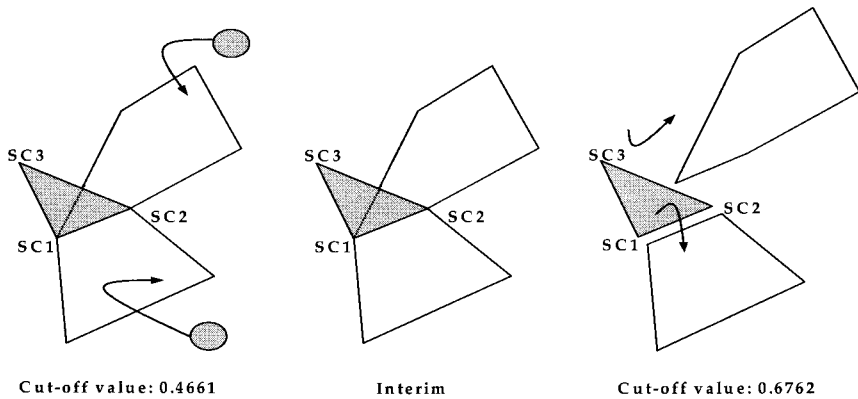
코드	node 수	cut-off 값	linkage 수	비고
(가)	209	> 0	1051	
(나)	209	> 0.2841	500	
(다)	209	> 0.3807	300	
(라)	209	> 0.4661	200	
(마)	209	> 0.6762	80	
(바)	209	> 0.7955	50	

11) 본 연구에서는 특정연구 분야의 중요성에 대한 고찰 및 평가를 실시하기 위한 것이 아니며, 제목에서 언급된 다학제적 동태추적의 수단으로 노드의 종류와 링크의 크기(또는 세기)로 수행된 것이고 각 노드의 크기는 고려하지 않았음을 밝혀둠.



(그림 3) cut-off 값에 따른 분야 코드 네트워크의 변화

상기 (그림 3)을 관찰해 보면, 에너지 분야(SC1)와 연료 분야(SC2), 전기화학 분야(SC3)가 네트워크상에서 기하학적으로 동일 평면상에 배치되어 있고, cut-off 값의 임의 조정에 따라 SC1과 SC2의 직선과 공유하는 새로운 평면이 2개 발생했음을 확인할 수 있다((그림 4) 참조).



(그림 4) 임의 cut-off 값의 조정 기준

따라서 에너지 분야와 연계성이 높은 영역을 추출하기 위해서는 cut-off 값이 (라)와 (마) 사이의 임의 값(0.4661 > value > 0.6762)으로 결정되어야 할 것이다. 본 연구에서는 0.5001값을 선정하여 분석하였고 에너지 분야 연관도 전산모사를 위해서 필요한 관계 기준을 확보하였다.

V. 에너지 분야 연관도 전산모사

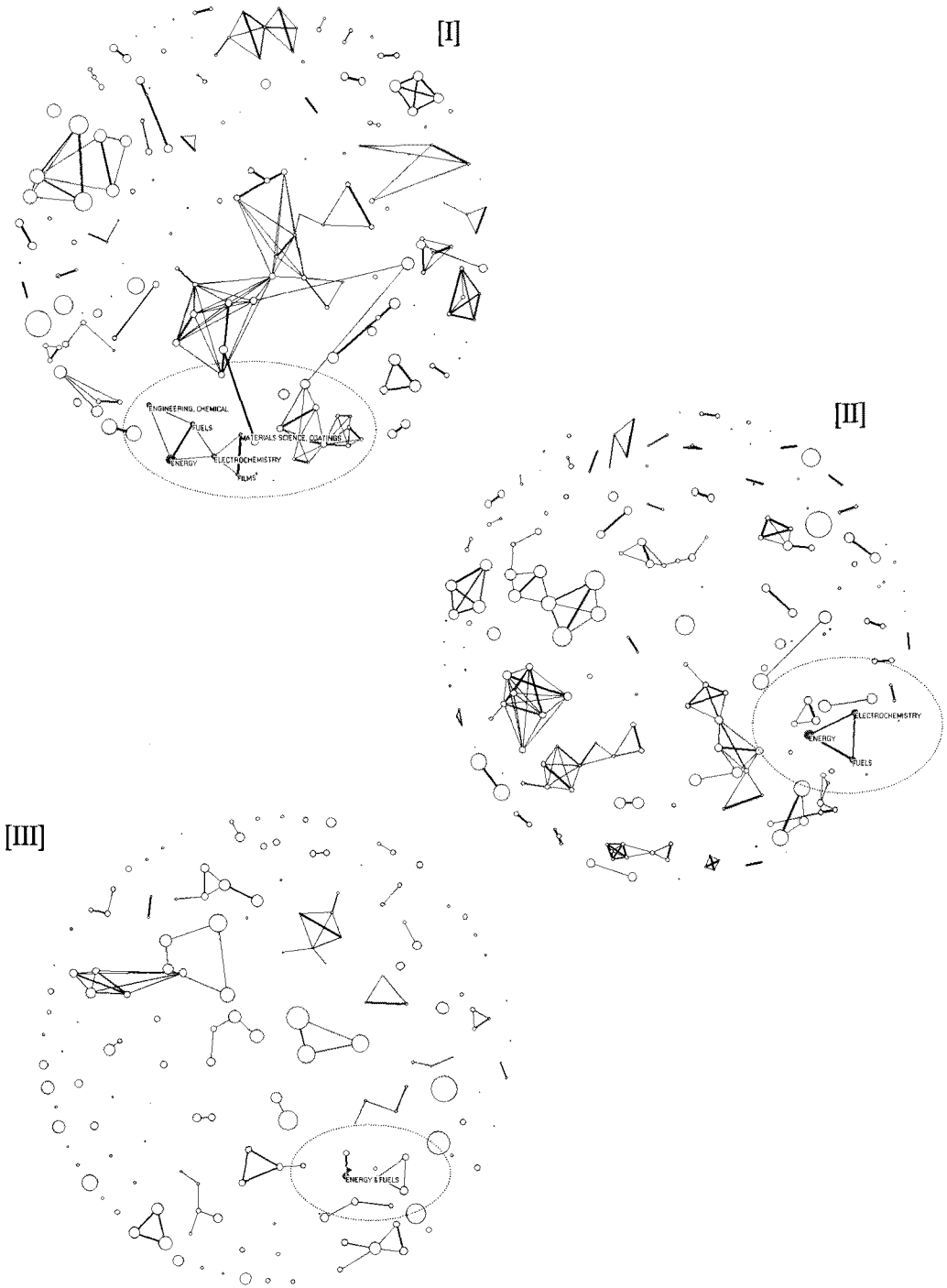
우선 분야 연관도를 그림으로 보여주는 동시발생분석을 수행하기 전에, 연관관계의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해 분석 모집단을 3년씩 분절하고, 최종 년도는 중복되게 하여 전산 모사를 실시하였다.

〈표 4〉 임의 조정 구간에 대한 네트워크 특성

구 간	기 간 (핵심논문 수)	node 수	cut-off 값	linkage 수(/A)※
Ⅱ	1999~2001년 (6,413건)	191	> 0.5001	174/792
Ⅲ	2001~2003년 (10,926건)	207	> 0.5001	174/909
Ⅳ	2003~2005년 (7,025건)	158	> 0.5001	76/467

※ node 수: 해당기간의 핵심논문에 나타난 전체 SC의 수

※ A: cut-off 값을 0으로 계산된 (전체) linkage 수



(그림 5) 에너지 분야의 연계 분야 코드 및 연계 강도 변화

전산모사의 결과, (그림 5)와 같이 분야 연관도 맵을 최종적으로 얻을 수 있으며, [II]과 [III] 그리고 [III]의 관계변화는 시간에 대한 구조변화(노드와 링크로 구성된 맵의 구조)로 이해 할 수 있을 것이다.

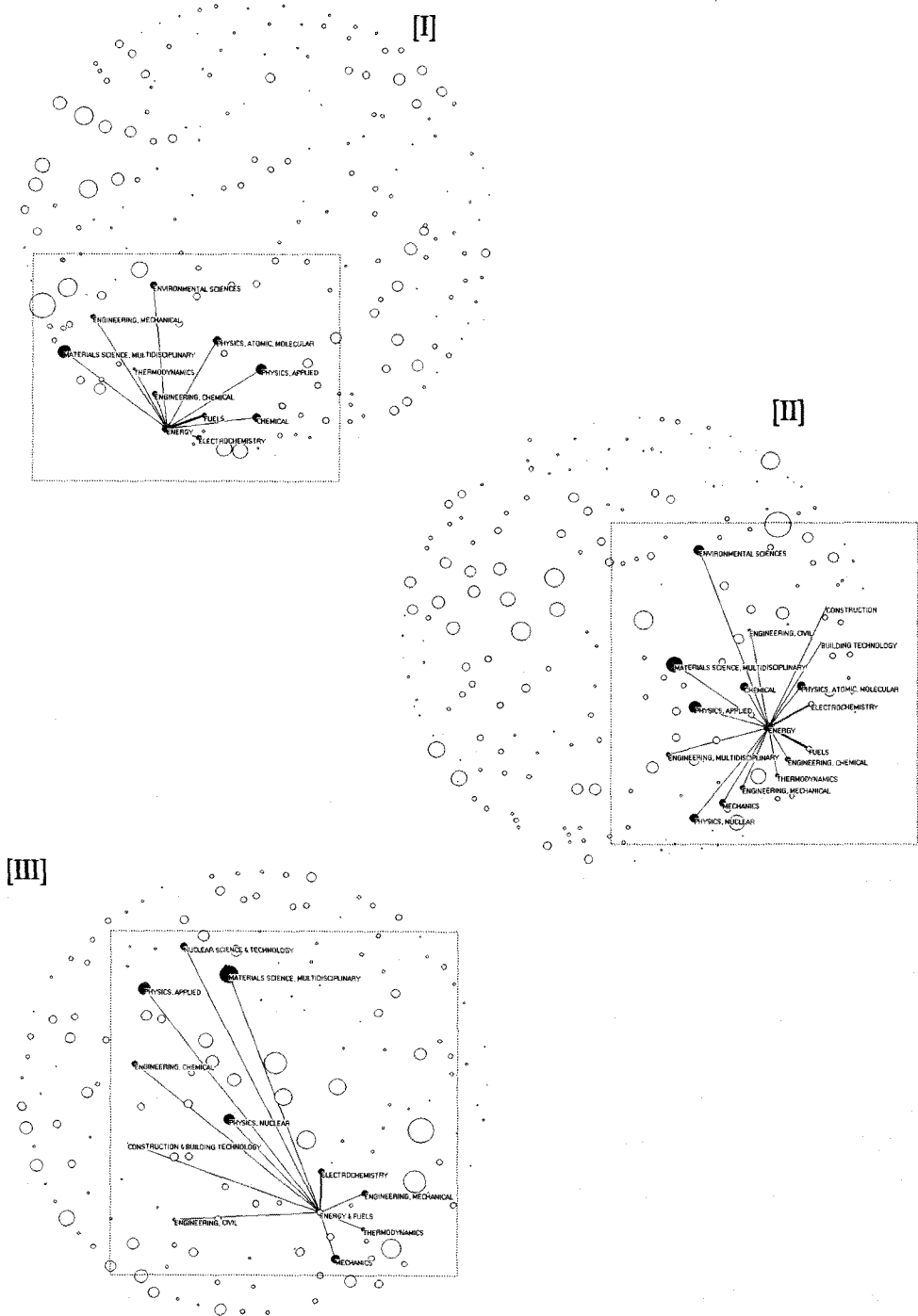
- ▶ [II]의 구조해석: 에너지(energy) 분야와 강한 연관성을 가진 연구 분야는 연료 분야(fuels), 화학공학 분야(chemical engineering), 필름(films), 코팅·재료공학(material science, coating), 그리고 전기화학(electrochemistry)으로 파악된다. 특히, 에너지와 연료 분야 및 필름과 코팅·재료공학분야는 각각 연관도 값이 0.9 이상으로 가장 강한 연관성을 보이는 것으로 나타났다. 또한 이 두 영역은 0.68의 연계강도로 전기화학 분야를 매개로 연계된 구조를 보인다(simple density¹²⁾: $7/15 \approx 0.48$; weighted density: $4.89/15 \approx 0.32$).
- ▶ [III]의 구조해석: 에너지(energy) 분야와 강한 연관성을 가진 연구 분야는 연료 분야(fuels), 전기화학 분야(electrochemistry)로 확인된다. 에너지, 연료 및 전기화학 분야가 동일 평면 상에 강하게 연계된 구조를 보이고 있는데, 이것은 [II]에서 확인된 필름, 코팅·재료공학, 화학공학 분야가 연관도 값 0.5 이하로 연계강도가 약화되어 누락된 결과이다. 또한 에너지/연료 분야의 연계 강도는 0.93, 연료/전기화학 분야의 연계 강도가 0.84, 전기화학/에너지 분야가 0.81로 [II]의 구조에서 확인된 연계강도보다 강화되었음을 확인할 수 있다(simple density: $3/3 = 1$; weighted density: $2.39/3 \approx 0.79$).
- ▶ [III]의 구조해석: 가장 특이한 사항은 [II]과 [III]에서 확인된 에너지(energy) 분야와 연료(fuels) 분야가 하나로 통합되어 새로운 에너지·연료 분야(energy & fuels)로 나타났다는 것이고 에너지·연료 분야(energy & fuels)와 전기화학 분야의 연계강도가 [III]에서 확인된 값보다 더 큰 강도를 보이는 것이다(simple density: $1/1 = 1$; weighted density: $0.83/1 \approx 0.83$).

따라서 에너지 분야의 연관도 네트워크상에서의 시간에 따른 구조 변화의 특이성은 에너지와 연관성이 큰 분야 간의 융합 및 통합적 분야의 출현과 구조내의 density 증가로 대표될 수 있을 것이다.

상기 (그림 5)에서는 분야 코드인 ‘에너지’를 중심으로 연계강도가 강한(cut-off 값이 >0.5001으로 설정함) 영역의 연관도 맵을 구조적으로 해석하였다.

(그림 6)에서는 분야 코드 ‘에너지’를 중심으로 모든 연계성을 보이는(즉, 링크 강도를 임의 조정하지 않은 cut-off 값을 0으로 설정함) 분야 코드를 도출하였다.

12) 네트워크 구조의 density는 4가지의 계측방법이 알려져 있으나, 본 연구에서는 simple density 방법과 링크의 계량 값(weight)을 고려한 계측방법을 이용하였다. simple density는 주어진 노드(g)를 기준으로 수학적으로 가능한 모든 링크 수, $[g(g-1)/2]$, 와 실제 존재하는 링크 수의 비(ratio)로 주어지며, weighted density는 $\sum_{k=1}^n V_k/g(g-1)$ 로 계산.



(그림 6) 에너지 분야와 연계된 전체 분야 코드

(그림 6)의 [I]과 [II] 그리고 [III]의 변화관계는 시간에 따른 구조변화를 나타낸 것으로 전산 모사를 통해 에너지 분야와 연계된 학제분야코드 맵을 최종적으로 얻을 수 있으며, <표 5>에 각 구간별 연계 학제분야를 정리하였고 신규진입 또는 융합적 분야를 구분 제시하였다.

<표 5> 신규진입 및 융합 학제분야 조사

분야 구간	연계 학제분야(SCs)※	융합적 학제분야(SC)
[I]	환경과학(environmental science), 기계공학(engineering, mechanical), 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary), 열역학(thermodynamics), 화학공학(engineering, chemical), 연료(fuels), 전기화학(electrochemistry), 화학(chemical), 응용물리(physics, applied), 원자/분자 물리학(physics, atomic or molecular)	융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary)
[II]	환경과학(environmental science), 기계공학(engineering, mechanical), 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary), 열역학(thermodynamics), 화학공학(engineering, chemical), 연료(fuels), 전기화학(electrochemistry), 화학(chemical), 응용물리(physics, applied), 원자/분자 물리학(physics, atomic or molecular), 토목공학(civil engineering), 건축(construction), 빌딩공학(building technology), 응용역학(mechanics), 핵물리학(physics, nuclear), 복합공학(engineering, multidisciplinary)	융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary), 융·복합 일반공학(engineering, multidisciplinary)
[III]	기계공학(engineering, mechanical), 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary), 열역학(thermodynamics), 화학공학(engineering, chemical), 에너지·연료(energy and fuels), 전기화학(electrochemistry), 응용역학(mechanics), 응용물리(physics, applied), 핵물리학(physics, nuclear), 건축·빌딩기술(construction and building technology), 핵 과학 및 기술(nuclear science and technology)	에너지·연료 분야(energy & fuel), 건축·빌딩기술(construction and building technology), 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary)

※ 각 구간에서 에너지(SC)와 연계된 학제분야를 추출한 것으로 밑줄이 있는 분야는 신규진입 연계분야임.

- ▶ [I]의 분야 해석: 에너지(energy) 분야와 연계성(링크)을 가지는 모든 연구 분야는 코팅·재료공학(material science, coating), 기계공학 분야(mechanical engineering), 환경과학(environmental science), 열역학(thermodynamic), 연료 분야(fuels), 화학/화학공학 분야(chemistry/chemical engineering), 필름(films), 원자/분자 물리학(atomic or molecular physics), 전기화학(electrochemistry), 그리고 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary)로 나타난다.
- ▶ [II]의 분야 해석: [III]의 기간에 나타난 에너지(energy) 분야와의 연계성을 가진 연구 분야는

핵물리(nuclear physics), 기계공학 분야(mechanical engineering), 코팅·재료공학(material science, coating), 환경과학(environmental science), 열역학(thermodynamic), 연료 분야(fuels), 건축/건설공학(building/construction technology), 토목공학(civil engineering), 화학/화학공학 분야(chemistry/chemical engineering), 필름(films), 원자/분자 물리학(atomic or molecular physics), 전기화학(electrochemistry), 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary), 그리고 기타 분야(multidisciplinary)로 구성되고 있다.

- ▶ [III]의 분야 해석: [III] 기간의 에너지(energy) 분야와 연계된 분야로서는 핵물리(nuclear physics), 핵 과학/기술(nuclear science & technology), 응용/물리학(atomic or molecular), 화학/화학공학 분야(chemistry/chemical engineering), 기계공학 분야(mechanical engineering), 열역학(thermodynamic), 에너지/연료 분야(energy/fuels), 건축/건설공학(building/construction technology), 토목공학(civil engineering), 전기화학(electrochemistry), 그리고 융·복합 재료과학 분야(material science, multidisciplinary)로 파악된다.

따라서 [I], [II], [III]의 시간변화에 따른 “에너지 분야”에 대한 타 학제 연계성은 지속적으로 변화되는 양상을 확인 할 수 있으며, 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

▶ 재료과학, 전기화학 관련 분야의 강한 연계 지속

[II], [III], [III]의 전 구간에 걸쳐 열역학(thermodynamic), 연료 분야(fuels), 화학/화학공학 분야(chemistry/chemical engineering), 전기화학(electrochemistry), 그리고 융·복합 재료과학(material science, multidisciplinary)은 전통적으로 연계성이 강한 분야로 파악되며 에너지 분야의 기초 및 응용 분야로 이해될 수 있을 것이다. 또한 환경과학(environmental science)에서 에너지 분야의 연구로서 매우 중요한 부분을 차지하고 있는 분석된다.

▶ 핵물리 관련 분야의 세분화와 연계 영역 확장

[II]의 구간에서 파악되는 핵물리 분야는 원자/분자 물리학(atomic or molecular), 응용 물리학(applied physics)이며, [III] 구간에서 파악된 분야는 핵물리(nuclear physics), 원자/분자 물리학(atomic or molecular), 응용 물리학(applied physics)로 조사되어 핵물리 분야가 새롭게 분화된 것을 확인할 수 있다. 또한 [III] 구간에서는 핵물리(nuclear physics), 응용 물리학(applied physics), 핵 과학기술(nuclear science & technology)로 세분화되어 발전되고 있다.

▶ 건축/건설공학, 토목공학의 부상

[II] 구간에서는 전혀 나타나지 않은 분야로 확인되었으나((그림 5) 참조), [III]와 [III] 구간에서 새롭게 확인된 분야이다. [III] 구간에서 건설 분야(construction)와 건축 분야(building

technology), 그리고 토목공학(civil engineering)으로 확인되며, 또한 [III] 구간에서는 건축과 건설기술이 통합되어 건설/건축기술(construction/building technology)로 도출되었고, 이와 함께 토목공학(civil engineering)이 연계되어 그 강도가 점진적으로 높아지고 있음을 알 수 있다.

▶ 연료와 에너지의 통합과 공진화

[II]과 [III] 구간에서는 에너지(energy) 분야와 연료 분야(fuel)가 독립적인 분야로 존재하고, 강한 연관관계(연관도 0.97)를 가지는 것으로 조사되었으나, [III] 구간에서는 상기 두개의 분야가 하나로 통합된 에너지·연료 분야(energy & fuel)로 진화하였다(〈그림 5〉 참조). 이것은 상호 두 분야의 연계성이 매우 높아 현재의 연구 추진에 있어서 거시적인 연구내용을 공유하는 공진화 현상(harmonized evolution)으로 이해할 수 있을 것이다.

환경과학이 에너지 분야의 연구에서 차지하는 비중이 점차 증가하는 것도 간과해서는 안 될 특성으로 파악된다. 결국 에너지를 생산하기 위해서 동반되는 비환경적 요소의 비용을 최소화하는 것이 핵심이며, 이는 국제적인 규제를 통해 직접적으로 통제¹³⁾가능한 문제일 것이다. 이산화탄소 저감을 동반한 에너지 재생기술 등을 예로 들 수 있다. 따라서 에너지 생산 자체의 연구 분야와 오염제어기술을 동반한 형태의 에너지 관련 기술이 포괄적으로 연계되어 있음을 확인할 수 있다.

VI. 결 론

1. 요약

본 연구에서는 미국 Thomson scientific에서 제공하는 RF(research front) 데이터에 각 연구 영역별로 포함되어 있는 핵심논문(Core Papers) 17,146건을 분석 모집단으로 선정하고, 각 핵심논문이 분류되는 분야(SC, subject categories)간의 동시발생분석을 수행하였다.

에너지 분야의 연구개발에 있어서 「다학제 협력 특성」을 파악하기 위해 SC간의 전체 연관도 맵을 전산모사를 통해 확보하고, SC¹⁴⁾ 중에 에너지 분야와 연관되어 있는 모든 분야를 추출,

13) 미국의 에너지성(DOE)에서 추진하고 있는 에너지관련 연구 분야에는 신에너지 및 재생에너지의 생산에 발생할 수 있는 방출물을 억제/제어하는 기술도 포함하고 있음. 대표적으로 이산화탄소 저감기술이 이에 해당 함.

14) SCI에서 제공하는 Energy & Fuels 분야의 category 설명 : Energy & Fuels는 재생 에너지원(solar, wind, biomass, geothermal, hydroelectric 등)과 비재생 에너지원 (wood, coal, petroleum, and gas 등)으로 구분하고 있으며, 이들의 개발, 생산, 사용, 응용, 전환, 관리 등을 포함함. 또한, nuclear energy와 nuclear technology는 NUCLEAR SCIENCE & TECHNOLOGY category로 지정하고 있음.

발생빈도 및 연계강도를 추적하였다. Cut-off 값의 임의 조정에 따라 에너지 분야와 연료 분야, 그리고 전기화학 분야는 네트워크상에서 기하학적으로 동일 평면상에 배치됨을 확인하였다. 연계강도 0.5에서 에너지 분야 연관도 전산모사를 위해 적합한 관계 값을 제시하였다. 또한, 연관 관계의 시간에 따른 변화를 파악하기 위해 3구간으로 임의 분절하고¹⁵⁾, 네트워크 구간 변화에 따른 밀도 변화(〈표 6〉 참조)와 연계분야 변화(〈표 7〉 참조)를 각각 추적하고 분석하였다¹⁶⁾.

〈표 6〉 구간별 네트워크 밀도

구 간	node 수	linkage 수 (/A)※	simple density	weighted density
Ⅱ	191	174/792	0.48	0.32
Ⅲ	207	174/909	1	0.79
Ⅳ	158	76/467	1	0.83

※ Ⅱ)1999-2001년(6,413건), Ⅲ)2001-2003년(10,926건), Ⅳ)2003-2005년(7,025건), cut-off 0.5를 적용

파악된 구조적 변화를 살펴보면 연계되는 학문분야 코드(SC, 링크) 수는 감소되는 반면 네트워크 구조의 밀도는 증가하는 경향을 보였다. 또한, 구간별 연관 분야의 변화에서 에너지와 관련된 신규진입 분야 코드 수는 구간 Ⅳ에서 6개(토목공학(civil engineering), 건축(construction), 빌딩공학(building technology), 응용역학(mechanics), 핵물리학(physics, nuclear), 복합공학(engineering, multidisciplinary)), 구간 Ⅳ에서 1개(핵 과학 및 기술(nuclear science and technology))로 파악되었고, 융합 분야는 지속적으로 증가되는 추이를 관찰할 수 있었다(〈표 7〉 참조). 특히, 재료과학, 전기화학 관련 분야의 강한 연계 지속, 핵물리 관련 분야의 세분화와 연계 영역 확장, 건축/건설공학, 토목공학의 부상, 연료와 에너지의 통합과 공진화로 특징지을 수 있다.

〈표 7〉 구간별 연관 분야의 변화

특이성 구간	전체연관분야 수 (cut-off 값 0)	특정연관분야 수 (cut-off 값 0.5)	신규진입분야 수 ¹⁾	융합분야 수 ²⁾
Ⅱ	10	6	-	1
Ⅲ	16	3	6	2
Ⅳ	11	1	1	3

※ Ⅱ)1999-2001년(6,413건), Ⅲ)2001-2003년(10,926건), Ⅳ)2003-2005년(7,025건), cut-off 값 0 적용

¹⁾ 전·후 구간의 비교로서 도출하였고, 따라서 초기구간Ⅱ에서는 변화가 없는 것으로 간주함.

²⁾ 융합분야는 Web of Science에서 제공되는 분야분류(subject category)에서 multidisciplinary로 제공된 분야와 전 구간(previous period)의 분야코드를 기준으로 통합된 분야코드를 보이는 것으로 정의 함.

15) 임의 분절의 원칙은 없으나, 네트워크 상의 구조연계성 파악을 용이하게 하기 위해서 분절된 양 구간의 일정기간을 중첩시키는 방법을 이용함.

16) 본 연구에서 이러한 연구방법을 동적연계분석(Dynamic Similarity Analysis)으로 명명.

2. 정책적 함의(에너지 정책을 중심으로)

최근 정부는 녹색기술 부문 R&D 투자규모를 2012년까지 연간 2조원 수준으로 높여 향후 4년간 6조3000억원을 투입하고 녹색기술 기초·원천연구 투자비중을 2007년 17%(1500억원)에서 2012년 35%(7000억원)로 확대키로 했다.

구체적으로, 신재생에너지, 탄소저감 에너지, 고도 물처리, 발광다이오드(LED)응용, 그린 수송시스템, 첨단 그린도시 등 신성장동력을 뒷받침하는 태양전지 고효율 저가화 기술, 이산화탄소 포집 및 저장·처리기술 등 21개 원천기술 과제와 기후변화 예측 및 모델링 개발기술 등 신성장동력화의 기반을 이루는 공공적 기술과제 6개 등 총 27개 과제를 담은 녹색기술 연구개발 종합대책을 발표하였다.

본 연구에서 수행된 과거 논문을 대상으로 한 연계 추이분석은 분석 대상 기간에 투영된 연구결과로 한정되어야 하며, 미래 예측의 논점에서 해석되지 않기를 기대한다. 다만, 향후의 기술발전이 학문분야 간 융합 및 연계성의 강화로 진화되는 특성을 보일 것으로 기대됨에 따라 본 연구에서 파악하고자 하는 연구의 방향은 정합적이라고 할 수 있다. 녹색기술 연구개발 종합대책을 살펴볼 때, 전반적으로 본 연구결과로 나타난 기술 분야 간 연관성, 동태적 변화 추세와 일치하는 부분이 많은 것을 알 수 있으며, 대표적으로 20년 이상 장기투자과제로 진행 중에 있는 핵융합로 설계 분야는 건설기술과 상당히 융합적으로 추진되고 있는 사실과 일치된다고 볼 수 있다.

세계에너지 전망(World Energy Outlook, 2008)에 따르면 에너지 소비는 2006년 11,730 Mtoe에서 2030년 약 17,014 Mtoe로 1.6%의 연평균증가율로 증가할 것이라고 한다. 에너지의 안보화 추세, 그리고 기후환경변화에 따른 위험, 기술적 진보 등을 감안할 때, 국가차원의 충분한 대비가 매우 중요하다. 본 연구가 논문추세 분석에 한정되어 있는데, 앞으로 미래과학 기술예측조사와 논문특허 분석을 결합한 통합분석모델을 개발하여 보완할 필요가 있다.

이와 더불어 녹색기술 연구개발 종합대책과 관련해서 대규모 연구개발비가 얼마나 효과적으로 투입되고 있는지, 얼마나 유기적으로 연계하여 진행되고 있는지, 그 성과는 얼마나 되고 어떻게 나타나고 있는지 등을 동태적으로 추적 관찰하는 것은 후속연구를 통해 규명되어야 할 것으로 생각된다. 이에 따라, 최근 3년간에 누적된 정보원을 대상으로 본 연구에서 수행된 내용과 동일범주의 분석을 수행 중에 있으며, 새롭게 변화된 에너지 분야의 학문간 동태적 변화상을 다시 재추적 관찰하는 연구가 현재 진행 중에 있음을 밝혀 둔다.

참고문헌

- 고병열, 노현숙 (2005), “특허 추세/IOM/SOU/키워드 분석을 통한 미래유망 기술시장 발굴 프로세스”, 「한국기술혁신학회 2005년 춘계학술대회」, pp. 249-262.
- 교육과학기술부(2010), 「과학기술연감 2009」, 서울: 교육과학기술부.
- 사이언스타임즈(2009), 「신성장동력 17개 과제 최종확정」, 서울: 사이언스타임즈.
- 신재인 (2005), “글로벌 Top 10의 선진한국 구현: 미래 국가유망기술 21 선정결과와 기대효과”, 「나라경제」, 제16권 제10호 통권 제179호 pp. 17-20.
- 에너지관리공단(2006), 「2000년대 에너지 전략: 미국과 일본의 중장기에너지절약정책 중간보고서를 중심으로」, 서울: 국회도서관.
- 에너지경제연구원(2009), 「세계 에너지 전망 2008」, 경기: 에너지경제연구원.
- (주)알앤디비즈(2009), 「2009 신성장동력 시장백서」, 경기: (주)알앤디비즈.
- 첨단기술정보분석연구회(2009), 「신성장동력 산업 비즈니스전략」, 서울: 진한엠앤비.
- 홍성준 (2008), “미래전략 에너지기술개발 영향요인 중요도 산출 - AHP 적용 중심으로 -”, 홍성준 외 4인 공저, 「한국신재생에너지학회 2008년도 춘계학술대회 논문집」, pp. 91-94.
- Amsterdamska, O. : Leydesdorff, L. (1989), “Citation: Indicator of significance”, *Scientometrics*, 15, p449-471.
- Corrocher, N., Malerba, F., & Montobbio, F. (2003), “The emergence of new technologies in the ICT field: main actors, geographical distribution, and knowledge sources”.
- Day, G. S., & Schoemaker, P. J. H. (2000), “A different game. In G. S. Day & P. J. H. Schoemaker (Eds.)”, *Wharton on Managing Emerging Technologies*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- D. J. de Solla Price(1963), “Little Science”, Columbia university Press.
- E. Garfield et al., (1993), “Essays of an Information Scientist”, No. 19.
- Hung, S. C., & Chu, Y. Y. (in press), “Stimulating new industries from emerging technologies: challenges for the public sector”, *Technovation*, p. 1-7.
- Porter, A. L., Roessner, D., Jin, X.-Y., & Newman, N. C. (2002), “Measuring national emerging technology capabilities”, *science & public policy* 29(3), p. 189-200.
- J. S. Katz, Science Foresight Project, Final Report Vol. 1, SPRU Sussex Univ.

강종석

응용화학공학으로 박사학위(2002, 한양대)를 취득하였고, 이후 ARC(오스트리아)와 TPAC(조지아공대, 미국)에서 기술계량분석을 통한 기술진화 및 신기술예측, 네트워크분석 기반 신기술 모니터링 시스템 개발 등에 post-doctoral researcher로 연구하였고, 현재는 한국과학기술정보연구원의 미래 기술연구팀에 재직 중에 있다. 주요 논문은 systematic approach for monitoring competitor's technological challenges based on patent analysis(2010, Int. J. Information, Vol.13, No.2, p339-352) 외 SCI/SCIE/SSCI 20여 편이 있고, 국내 논문 및 저술 등 다수가 있다.

정현상

부산대학교에서 고분자공학 박사과정을 수료하였으며, 현재 한국과학기술정보연구원에서 선임연구원으로 근무 중이다. 주요 저서는 정밀화학 R&D 기획 및 사업화 전략, 정밀화학 R&D 시장정보조사분석 실무, 정밀화학 R&D 산업재산권 활용 실무 등이 있으며, 주요 연구 분야는 기술시장정보분석 방법론, 화학분야 전산모사 등이다.

이일형

한양대학교에서 공학 박사학위를 취득하고 현재 한국과학기술정보연구원 부산울산경남지원 지원장으로 재직 중이다. 관심분야는 나노기술, 신재생에너지 및 에너지변환 등이다.